

Univerzita Karlova v Praze  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Petra Rotová

## **ANALÝZA SVAHOVÉ DEFORMACE ZÁŘEZU DÁLNICE D11**

## **ANALYSIS OF A SLOPE DEFORMATION OF THE D11 MOTORWAY CUT**

*Diplomová práce*

Praha 2014

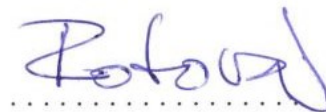
Vedoucí diplomové práce: RNDr. Petr Tábořík, Ph.D.  
Konzultant diplomové práce: Mgr. Richard Malát

**Prohlášení:**

Diplomovou práci jsem vypracovala na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky pod vedením vedoucího práce RNDr. Petra Táboříka, Ph.D a konzultanta Mgr. Richarda Maláta. Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci zpracovala samostatně. Použila jsem pouze své laboratorní výsledky, vlastní modely a všechny použité informační zdroje a literatura jsou uvedeny v seznamu literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu. Souhlasím s jejím zapůjčením ke studijním účelům.

V Praze dne 7.8.2014

Bc. Petra Rotová



**Poděkování:**

Své poděkování bych především ráda věnovala vedoucímu diplomové práce RNDr. Petru Táboříkovi, Ph.D, za velice příkladné vedení práce, za odbornou pomoc při její tvorbě, za velikou ochotu, přívětivost, rady, konzultace a čas. Dále bych ráda poděkovala konzultantu Mgr. Richardu Malátovi za jeho nedocenitelné rady při práci v softwarech, za jeho obrovskou ochotu a čas. Také bych chtěla poděkovat panu Zbyňku Suchánkovi z ŘSD, SSÚD Pravy za povolení přístupu na lokalitu a za jeho velmi vstřícné jednání. Děkuji firmě INSET s.r.o. za umožnění práce se softwarem GEO5 a Mgr. Miladě Šandové za poskytnutá meteorologická data. Poděkování také patří Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze za to, že mi umožnila zde vystudovat a všem, kteří mě učili a předali mi hodnotné znalosti. A v neposlední řadě patří mé poděkování i členům rodiny za jejich trpělivost a psychickou podporu.

## **ABSTRAKT:**

Tato diplomová práce se skládá z rešeršní a praktické části. V části literární rešerše je shrnut problém svahových pohybů. Praktická část se zabývá stanovením příčin svahové deformace v zářezu dálnice D11 na 76. km. Příčiny byly určeny na základě laboratorních zkoušek provedených v laboratoři mechaniky zemin PřF UK na odebraných vzorcích zemin z porušeného zářezu dálnice. Byly provedeny zkoušky zrnitostního složení, stanovena plasticita na vzorku L 26 a dále stanovena kritická pevnost rekonstituovaného vzorku L 26 a L 27 v translačním krabicovém přístroji. Zeminy byly zatříděné dle příslušných norem a získaná data byla vyhodnocena. V programu BricsCAD byla vykreslena přehledná situace na lokalitě a příčný řez svahovou deformací podložený geofyzikální řezem ERT. V programu GEO5 byly vytvořeny modely stability svahu podle Spencerovy proužkové metody mezní rovnováhy. Byla určena poloha smykové plochy a hladina podzemní vody při porušení svahu.

Praktická část se také zabývá návrhem vhodné sanace pro tuto deformaci a jejím vymodelováním opět v programu GEO5. Pro sanaci je stanoven stupeň stability svahu.

Práce se opírá o odbornou literaturu, články, výzkumné zprávy a normy.



## **ABSTRACT:**

This diploma thesis consists of a research and a practical part. The research part summarises the problem of slopes movements. The practical part deals with the determination of the slope deformation causes, at the 76th km of the D11 motorway. Causes determination was based on laboratory tests of soil samples taken from the disrupted motorway cut, made at PřF UK soil mechanics lab. Tests of grain size composition were done, plasticity of the L 26 sample was determined and critical strength of the reconstituted L26 and L27 samples was found out in the Translational apparatus box. Soils were categorized due to the according standards and the acquired data were evaluated. In the BricsCAD software, a well arranged locality situation and the slope deformation crosscut underlayed with the geophysical ERT cut were illustrated. In the GEO5 software, slope stability models were created using the Spencer Method of Slices. The slip surface and the groundwater level during the disruption were determined.

The practical part also covers a proposal of a remediation appropriate for this deformation and it's modelling in GEO5. For the remediation, the slope stability level is determined.

The work is based on the specialized literature, articles, research reports and standards.

## OBSAH:

<b>1. ÚVOD A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....</b>	<b>2</b>
2.1. SVAHOVÉ POHYBY .....	2
2.1.1. <i>Geologické struktury příznivé pro vznik svahových deformací</i> .....	3
2.1.2. <i>Klasifikace svahových pohybů a svahových deformací</i> .....	5
2.1.3. <i>Registr svahových nestabilit</i> .....	10
2.2. SESUVY .....	11
2.2.1. <i>Části sesuvu</i> .....	13
2.2.2. <i>Druhy sesuvů</i> .....	13
2.2.3. <i>Ohrožení sesuvem</i> .....	15
2.2.4. <i>Metody průzkumu sesuvů</i> .....	20
2.3. ZÁKLADNÍ TYPY OPATŘENÍ - SANACE .....	20
<b>3. PŘÍKLADY VÝZNAMNĚJŠÍCH SESUVŮ V ČR A V ZAHRANIČÍ .....</b>	<b>29</b>
<b>4. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>37</b>
4.1. REGIONÁLNĚ GEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY ZÁJMOVÉ LOKALITY .....	37
4.2. TERÉNNÍ PRŮZKUM .....	40
4.2.1. <i>Odběr vzorků</i> .....	42
4.2.2. <i>Stanovení rozměrů svahové deformace</i> .....	43
4.2.3. <i>Geofyzikální měření</i> .....	45
4.3. LABORATORNÍ ZKOUŠKY .....	46
4.3.1. <i>Zrnitostní zkouška</i> .....	47
4.3.1.1. <i>Sítový rozbor</i> .....	47
4.3.1.2. <i>Hustoměrná (aerometrická) zkouška</i> .....	48
4.3.1.3. <i>Tvar křivky zrnitosti</i> .....	49
4.3.2. <i>Plasticita</i> .....	49
4.3.2.1. <i>Mez tekutosti (<math>w_L</math>)</i> .....	51
4.3.2.2. <i>Mez plasticity (<math>w_P</math>)</i> .....	52
4.3.3. <i>Zkouška v translačním smykovém přístroji</i> .....	52
4.3.4. <i>Výsledky laboratorních zkoušek</i> .....	56
4.3.4.1. <i>Vyhodnocení zatřídování zemin</i> .....	56
4.3.4.2. <i>Vyhodnocení zkoušky v translačním smykovém přístroji</i> .....	62
4.4. PŘEHLEDNÁ SITUACE NA LOKALITĚ (PRÁCE V SOFTWARE BRICSCAD) .....	64
4.5. VÝPOČET STABILITY SVAHU ZÁŘEZU DÁLNIČE D11 .....	65
4.5.1. <i>Práce v softwaru BricsCAD</i> .....	66
4.5.2. <i>Práce v softwaru GEO5</i> .....	69
4.6. METEOROLOGICKÁ SITUACE .....	74
4.7. NÁVRH SANACE PRO SVAHOVOU DEFORMACI ZÁŘEZU DÁLNIČE D11 (PRÁCE V SOFTWARE GEO5) .....	76
<b>5. DISKUZE .....</b>	<b>78</b>
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>81</b>
<b>7. CITOVANÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE .....</b>	<b>82</b>
<b>8. PŘÍLOHY .....</b>	<b>86</b>
<b>9. TEXTOVÁ DOKUMENTACE .....</b>	<b>87</b>

## 1. ÚVOD A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Svahové pohyby jsou v některých oblastech naší republiky velmi hojným jevem, takže se podstatně podílejí na vytváření zemského povrchu a způsobují také veliké hospodářské škody. Často také člověk sám způsobuje sesouvání nesprávným zásahem do svahu nebo nevhodným postupem při jakýchkoliv stavebních pracích.

Svahové pohyby a jejich následky se stávají v některých krajinách závažným ekonomickým problémem. Proto je nutné se věnovat otázkám jejich vzniku, zabývat se jejich výzkumem a zabezpečováním (sanací). (Záruba, Mencl, 1987).

Geologové se zabývají svahovými pohyby jako jedním z nebezpečných geodynamických procesů, studují vznik, průběh a výsledné tvary s ohledem na utváření zemského povrchu. Naproti tomu inženýři a inženýrští geologové se snaží jednak poznat svahy náchylné k sesouvání, jejichž rovnováhu by mohlo projektované dílo porušit a dále stanovit největší sklony umělých svahů, které budou ještě stabilní. Protože přitom mají značnou odpovědnost za bezpečnost navrhovaného díla, studují nejen vnější tvary a příčiny vzniku sesuvů, ale hledají také vhodné metody ke spolehlivému zjištění stability svahů, aby mohli navrhnout vhodná opatření. Tato opatření jsou preventivní k ochraně před vznikem nových svahových pohybů, ale také k sanaci sesuvů, k zastavení pohybu a záchraně postižených objektů. Zejména při stavbách železnic, dálnic a průplavů bylo nutno zřizovat hluboké zářezy a vysoké násypy a právě s těmito stavbami je spjato kvantitativní vyšetřování stability svahů. Katastrofální sesuvy na švédských železnicích daly podnět k založení zvláštní geotechnické komise ve Švédsku v r. 1914. Studie této komise byly základem nového vědního oboru mechaniky zemin. (Záruba, Mencl, 1987).

Je ovšem třeba, aby se oba směry výzkumu doplňovaly a navzájem spolupracovaly. Pro kvantitativní stanovení stability svahů metodami mechaniky zemin je nezbytně třeba znát celkovou geologickou stavbu území, podrobný průběh a složení vrstev i morfologický vývoj reliéfu krajiny. Naopak geologové si mohou ujasnit podmínky vzniku a průběh sesuvných jevů, porovnávají-li svoje úvahy a výsledky pracovních metod a statických rozborů mechaniky zemin a hornin.

Pro inženýra i geologa je proto studium sesuvných jevů důležité z hlediska teoretického i praktického, neboť výzkum příčin, charakteru a vývoje svahových pohybů umožňuje posoudit velikost nebezpečí a najít správný způsob zabezpečení sesuvných území. Svahové pohyby, jež nebyly předvídaný nebo byly nesprávně pochopeny, mohou ohrozit výsledky společné práce i lidské životy. (Záruba, Mencl, 1987).

### **Cíle práce:**

Cílem této diplomové práce je stanovení příčin vzniku svahové deformace v zářezu dálnice D11 na 76. km a navrhnout vhodnou sanaci.

## 2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

Zemský povrch je stále v pohybu, krajina se stále vyvíjí a to nejen činností člověka. Sama si dokáže vytvářet svoji historii. Velmi zřetelně je to vidět i na mírných svazích. V poměru k délce lidského života se zdají jeho pohyby nepodstatné, přesto jsou mnohdy spojeny s tragédiemi, a to když se souhrou celé řady klimatických vlivů urychlí. (Hanzlíček et al., 2006).

Je důležité hledat a mapovat místa, která jsou náchylná k sesuvům a kde se hornina pohybuje třeba i jen po desetínách milimetrů za rok, abychom pak byli schopni říci „POZOR, zde stojíme před nebezpečím“. Z geologického hlediska není žádný svah trvale stabilní (Hanzlíček et al., 2006).

### 2.1. Svahové pohyby

**Svahový pohyb** je velmi různotvárný geodynamický jev, který vzniká při porušení stability svahu. Probíhá v přírodním prostředí a je podmíněn účinkem zemské gravitace, místními přírodními poměry a faktory, případně lidskou činností (Rybář et al., 1974):

- poměry: geologické (Obr. 5), geomorfologické, hydrogeologické a klimatické;
- faktory: změna geometrie svahu, vnější přitížení, vliv vody, vliv teploty, vliv zvětrávání, chemické vlivy, biologické faktory, zemětřesení, technické otřesy, tektonické procesy, časový faktor;
- lidská činnost: změny reliéfu krajiny, změny vodního hospodářství atd.

Za *svahový pohyb* v IG pojetí považujeme proces přemísťování horninových hmot po svahu účinkem zemské tíže (gravitace), přičemž těžiště pohybujících se hmot vykonává dráhu po svahu dolů (tj. z vyšších poloh do poloh nižších), dochází tak k přemístění, deformování a resedimentaci deluviálních sedimentů, svahových hlín, popř. horninového podkladu na svazích ve směru gravitace. (Rybář et al., 1974). Za svahové pohyby v užším slova smyslu nepovažujeme případy, když jsou horninové hmoty na svazích unášeny transportačním médiem (vodou, ledem, sněhem nebo větrem). (Nemčok, 1982 a Záruba, Mencl, 1987).

Výsledkem svahového pohybu (tj. procesu) je **svahová deformace** (tj. forma). (Rybář et al., 1971). Výsledná svahová deformace je potom soubor geologických struktur a forem reliéfu různého měřítka (mikro-, mezo- formy). (Rybář et al., 1974).

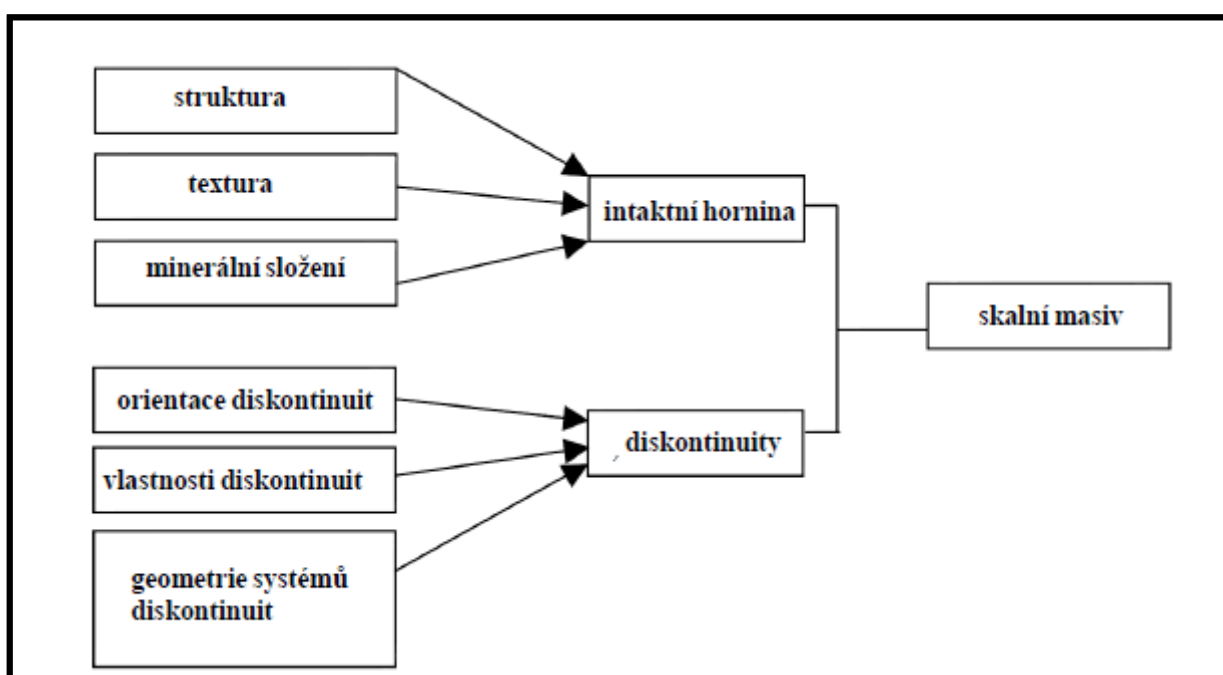
Někdy nastává problém při určování hranice mezi ryze svahovými procesy a procesy, při nichž se zapojují transportační média. Např. při procesu stékání dochází k rychlému pohybu svahového materiálu za účasti často výrazného podílu vody. Otázka, zda se jedná o gravitačně

podmíněný svahový proces, nebo o proces fluvialní. Rozlišení blokovobahenního proudu od náplavového kuželu tak nemusí být vždy jednoznačné. (Rybář et al, 1974).

### 2.1.1. Geologické struktury příznivé pro vznik svahových deformací

**Geologické struktury, které jsou příznivé pro vznik svahových deformací, kterými jsou skalní horniny a zeminy:**

A) Zásadními stabilitními vlastnostmi skalních hornin jsou *pevnost a přítomnost diskontinuit*.  
- zejména hustota diskontinuit (Obr. 1). (Dikau et al., 1996 a Ondrášek et al., 1991).



Obr. 1: Vlastnosti skalních hornin. (Dikau et al., 1996).

Pevnost intaktních hornin (neberou se v potaz diskontinuity) lze dle Dikau et al. (1996) zjišťovat:

- laboratorně mechanickými zkouškami;
- přímo v terénu pomocí tzv. Schmidtova kladívka (Schmidt hammer).

Faktory vstupující do analýzy *celkové pevnosti hornin* (zahrnuje intaktní pevnost + přítomnost diskontinuit) jsou: intaktní pevnost horniny, stupeň zvětrání, vzdálenost diskontinuit, orientace diskontinuit, šířka diskontinuit, průběžnost diskontinuit a jejich výplň a výtok podzemní vody. (Dikau et al., 1996).

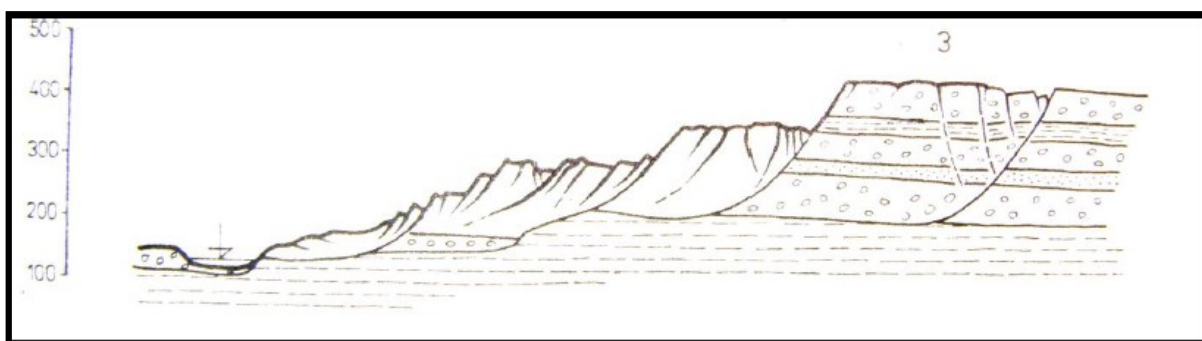
Typy diskontinuit skalního masivu dle Dikau et al. (1996):

- a) zlomy;
- b) pukliny;
- c) vrstevní plochy;
- d) foliace.

Důvody snížení stability skalního masivu diskontinuitami (Ondrášek et al., 1991):

- *zlomy*: vytváří plochy diskontinuit (zlomové plochy často fungují jako zóny sníženého tření ve skalním masivu a mohou sloužit jako smykové plochy), skokové změny fyzikálních charakteristik horniny, tvoří různě široké zóny snížené pevnosti skalního masivu a vytváří hydrogeologicky příznivé kolektory (zlomy často fungují jako zóny hlubokého oběhu podzemní vody; jedním z důsledků je zvýšená náchylnost k hlubokému zvětrávání, druhý aspekt jsou zvýšené hydrostatické tlaky podzemní vody);
- *pukliny*: vytváří plochy diskontinuit a doprovází v hustých systémech zlomy;
- *vrstevní plochy*: vytváří plochy diskontinuit, skoro vždy tvoří skokové změny fyzikálních charakteristik horniny (hranice mezi různými typy vrstev) vytváří hydrogeologicky příznivé kolektory;
- *plochy foliace*: vytváří plochy diskontinuit, tvoří různě široké zóny snížené pevnosti skalního masivu.

B) Množství jílu v zemině zásadně ovlivňuje její stabilitu. Na (Obr. 2) je zobrazen příklad sesuvu v zeminách bohatých na jílové minerály. Velkou úlohu ale hraje přítomnost vody. (Dikau et al., 1996). U zemin určujeme **konzistenční meze** podle jejich empiricky stanovených vlhkostí (viz. kap. 4.3.2. *Plasticita*). (ČSN CEN ISO/TS 17892-12).



Obr. 2: Příklad sesuvu v zeminách bohatých na jílové minerály. (Ondrášek et al., 1991).

Důvody snížení stability skalního masivu vlivem podložních měkkých hornin/zemin (Ondrášek et al., 1991):

- horniny se zabořují do podložních plastických vrstev;
- podložní měkké vrstvy jsou rychle odstraňovány erozí, což způsobuje odlehčování a následný kolaps vyšší části svahu;
- měkké podloží funguje jako smyková plocha;
- měkké podloží je většinou hydrogeologickým izolátorem.

### *2.1.2. Klasifikace svahových pohybů a svahových deformací*

Klasifikace svahových pohybů byla řešena celou řadou autorů. Jedním z největších problémů je ovšem určitá nesystematičnost, kdy se jednotliví autoři zaměřují na hodnocení často rozdílných parametrů a jednotlivé klasifikace tudíž nejsou dobře porovnatelné. Za nejkomplexnější a nejpropracovanější klasifikaci svahových pohybů lze považovat klasifikaci od autorů Rybáře, Nemčoka a Paška z roku 1974, jejímž základem jsou dvě kritéria:

- ***mechanismus pohybu***;
  - ***rychlost pohybu***.
- PODLE MECHANISMU SVAHOVÉHO POHYBU A JEHO RYCHLOSTI rozlišuje Rybář et al. (1974) 4 základní skupiny svahových pohybů (anglicky; německy; francouzsky; španělsky):
- A - Ploužení (creep; Kriechen; fluage; reptación);
  - B - Sesouvání (sliding; Gleiten; glissement; deslizamientos);
  - C - Stékání (flow; Fließen; éboulement; flujos);
  - D - Řícení (fall; Fallen; écroulement; derrumbe).

#### **A - Ploužení**

Z geologického hlediska jde o dlouhodobý, zpravidla nezrychlující se pomalý (mm/rok) pohyb horninových hmot, přičemž hranice vůči pevnému podloží je ve většině případech nezřetelná. Velikost posunů hmot je vzhledem k prostorovým rozměrům postiženého horninového masivu zanedbatelná. Pokud se tento pohyb vlivem různých faktorů (klimatické, antropogenní) zrychlí, přechází do sesouvání nebo stékání. Ploužení tak může být iniciační fází pro sesouvání, stékání

nebo dokonce řícení. Ploužení je nejobtížněji pozorovatelný a vymezitelný, ale nejrozšířenější typ svahového pohybu v ČR. (Rybář et al., 1974). Plouživé svahové pohyby a jejich výsledné formy jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1: Příklady plouživých svahových pohybů a jejich výsledných forem. (Upraveno podle Rybáře et al., 1974).

	Proces (svahový pohyb)	Forma (výsledná svahová deformace)
A	Rozvolňování svahů	Rozvolnění svahu, roztrhání horských masivů, zdvojené hřebety
	Gravitační vrásnění	Gravitační vrása, bulging
	Blokové pohyby	Blokové pole
	Povrchové ploužení	Slézání svahových hlín a suti, hákování vrstev, plošná soliflukce, kamenné ledovce

## B – Sesouvání

Sesouvání je relativně rychlý (cm až m/den), krátkodobě klouzavý pohyb horninových hmot na svahu podél jedné nebo více průběžných smykových ploch. Výslednou formou sesuvného pohybu (proces) je **sesuv**. Charakteristické je, že se část hmot nasune na původní terén v předpolí. Při sesouvání se mohou v hlubších částech současně uplatňovat i pomalé deformace plouživého charakteru, na povrchu i stékání. Tento nejčastěji dokumentovaný typ svahového pohybu v ČR postihuje např. rozsáhlé oblasti Beskyd, Českého Středohoří a Poohří. (Rybář et al., 1974).

Sesuvy vznikají z rozličných důvodů. Jejich vznik a samotný průběh má dle Poledňáka (2013) za následek nejen změnu rázu krajiny, ale může svým projevem ničit životní prostředí člověka:

- narušují stabilitu liniových staveb;
- znehodnocují silnice, dálnice a železniční tratě;
- ničí produktovody a stožáry elektrického vedení;
- ničí lesy.

## C – stékání

Stékání je rychlý (km/h) krátkodobý pohyb horninových hmot ve viskózním stavu. Podstatná část hmot vyteče z odlučného prostoru (jámy) a přemístí se po povrchu terénu na velkou vzdálenost (v ČR i stovky metrů). Stékající hmoty jsou ostře odděleny od neporušeného



podloží. Výslednou formou je **proud**. V konečné fázi vývoje může stékání přecházet do pomalého ploužení. V ČR se vyskytuje nepravidelně a je vázáno na extrémní srážky spolu s vhodnými geologickými a geomorfologickými podmínkami. (Rybář et al., 1974). Tekoucí svahový pohyb a jeho výsledné formy jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2: Příklad tekoucího svahového pohybu a jeho výsledné formy. (Upraveno podle Rybáře et al., 1974).

	Proces (svahový pohyb)	Forma (výsledná svahová deformace)
C	Stékání svahových uloženin	Zemní proud, bahnitý proud, zemní proud v citlivých jílech, kamenitý, hlinitokamenitý a bahnitý přívalový proud, mura, flowage

## D – řícení

Krátkodobý (řádově sekundy) rychlý pohyb horninových hmot na strmých svazích, přičemž se postižené hmoty rozvolní a ztrácejí krátkodobě kontakt s podložím. Při pohybu se uplatňuje volný pád. Dříve než hmoty ztratí kontakt s podložím, může docházet k plouživým pohybům. Vzdálenost přemístěných hmot je vzhledem k prostorovým rozměrům zříceného masivu mnohonásobně větší. Tento jev se nejčastěji vyskytuje v oblasti skalních pískovcových měst, u nás např. v oblasti Hřenska, Českého Ráje nebo Broumovska. (Rybář et al., 1974). Říťivé svahové pohyby a jejich výsledné formy jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3).

Tab. 3: Příklady říťivých svahových pohybů a jejich výsledných forem. (Upraveno podle Rybáře et al., 1974).

	Proces (svahový pohyb)	Forma (výsledná svahová deformace)
D	Sesypávání	Drolení, sesyp
	Opadávání úlomků	Opadový a suťový kužel, osyp, halda, kamenné moře
	Odvalové řícení	Skalní zřícení, odvalové zřícení
	Planární řícení	Planární skalní zřícení, skalní sesutí

- PODLE MECHANISMU SVAHOVÝCH POHYBŮ rozlišuje Varnes (1978) tyto skupiny svahových pohybů:

- boční rozvolňování (lateral spreading);

- odklánění (toppling);
- sesouvání (sliding);
- tečení (flowing);
- řícení (falling).

Srovnáme-li základní dělení svahových pohybů podle mechanismu Rybáře et al. (1974) a rozdělení dle Varnese (1978), zjistíme, že spolu silně korelují, přičemž „českoslovenští“ autoři zahrnují mechanismy rozvolňování (lateral spreading) a odklánění (toppling) do souhrnné kategorie ploužení (creep).

○ PODLE RYCHLOSTI SVAHOVÝCH POHYBŮ rozlišuje Varnes (1978) tyto skupiny svahových pohybů:

- mimořádně pomalý, plouživý (0,06 mm za rok);
- velmi pomalý, plouživý (0,6 – 1,5 m za rok);
- pomalý (1,5 m za rok až 1,5 m za měsíc);
- středně rychlý (1,5 m za měsíc až 1,5 m za den);
- rychlý (1,5 m za den až 0,3 m za minutu);
- velmi rychlý (0,3 m za minutu až 3 m za sekundu);
- mimořádně rychlý (0,3 m za minutu až 3 m za sekundu).

○ PODLE PRŮBĚHU SMYKOVÝCH PLOCH rozlišuje Savarenský (1939) tyto skupiny sesuvů:

- **asekventní** sesuvy – tvoří se ve stejnorodých soudržných zeminách, k pohybu dochází po zakřivených smykových plochách tvaru rotačního válce;
- **konsekventní** sesuvy – pohyb nastává po vrstevních plochách nebo jiných predisponovaných plochách;
- **insekventní** sesuvy – probíhají napříč vrstvami, bývají velkých rozměrů a smykové plochy zasahují hluboko do svahu.

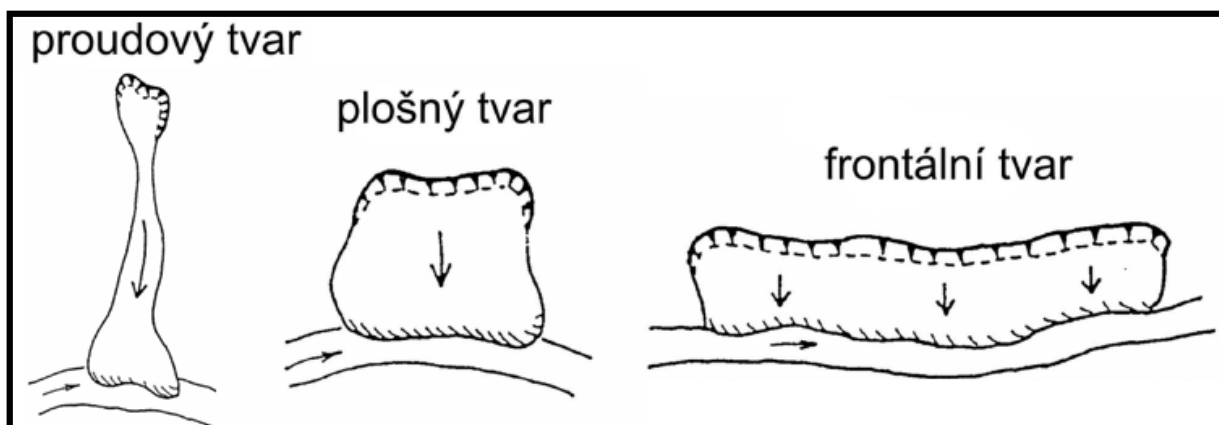
Dalším důležitým parametrem pro rozdělení sesuvů podle smykových ploch je podle Savarenského (1939) hloubka založení svahové deformace. V nejzákladnějším dělení rozlišuje:

- **hluboko založené (hluboké) svahové deformace** - rozvolňování svahu, blokové a kerné poklesy;
- **mělké svahové deformace** - např. povrchové ploužení, mělké sesuvy zemin.

Podle Savarenského (1939) existují ovšem i takové deformace, u nichž lze obtížně stanovit hloubku založení. Je to jednak proto, že není přesně stanovena mezní hodnota hloubky, od níž považujeme deformaci za hluboko založenou, a pak také existují mělké svahové deformace vázané (geneticky podmíněné) na hlubokou svahovou deformaci. Jako příklad lze uvést mělký sesuv skalních hornin, podmíněný blokovým poklesem (a následným rozvolňováním svahu), který je vázán na hluboko založenou tektonickou dislokaci. Mělký skalní sesuv je potom důsledkem původní hluboko založené deformace.

○ **PODLE DALŠÍCH KRITÉRIÍ SVAHOVÝCH POHYBŮ** rozlišuje Rybář et al. (1971) tyto skupiny svahových pohybů:

- **věk**: recentní (současný, čerstvý), starý (holocén), fosilní (pleistocén);
- **stupeň aktivity**: aktivní (živý), dočasně uklidněný, stabilizovaný (zastavený);
- **geneze**: přirozený (samovolný), uměle vyvolaný (antropogenní);
- **vývojové stadium**: iniciální (počáteční), rozvinutý (pokročilý), finální (závěrečné);
- **opakovatelnost**: jednorázový, periodický;
- **tvar půdorysu**: proudový, frontální, plošný, nepravidelný (Obr. 3);
- **zřetelnost morfologické formy**: zřetelná svahová deformace, zastřená svahová deformace, pohřbená svahová deformace;
- **pozice vůči dalším svahovým deformacím**: samostatná svahová deformace, složená svahová deformace, součást složené svahové deformace.



Obr. 3: Svahové pohyby podle půdorysného tvaru. (Upraveno podle Rybáře et al., 1971).

Rozdělení svahových pohybů a svahových deformací existuje celá řada. V kapitole (2.1.2. *Klasifikace svahových pohybů a svahových deformací*) jsem uvedla jen ty nejběžnější.

### 2.1.3. Registr svahových nestabilit

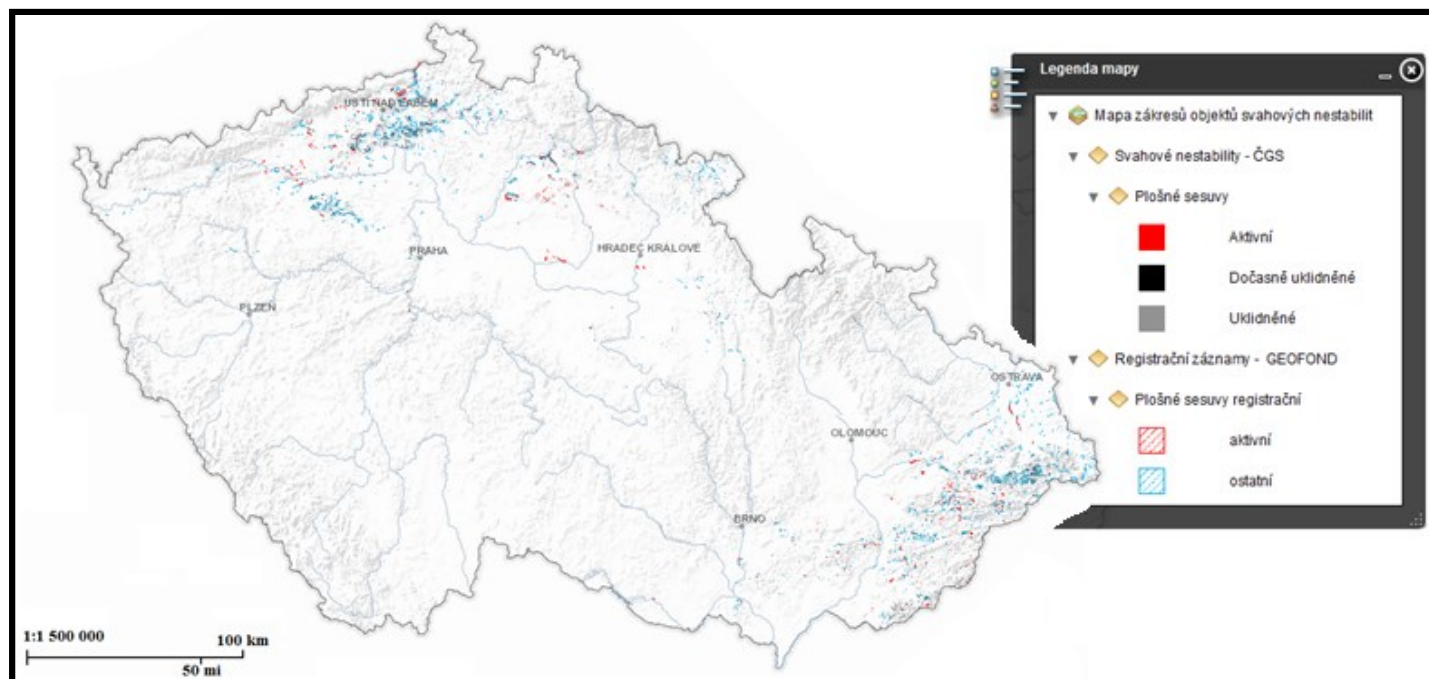
Registr svahových nestabilit slouží jako široce dostupný zdroj vysoce kvalitních, kompatibilních a verifikovaných prostorových informací o svahových nestabilitách pro potřeby státní správy a samosprávy v rámci ČR i na úrovni EU a dále pak pro potřeby všech občanů ČR.

Provozování Registru svahových nestabilit ČGS - Geofundu bylo od 1. 1. 2011 převedeno v plném rozsahu z České geologické služby – Geofundu na Českou geologickou službu. Veškeré informace a výstupy (územně analytické podklady pro ORP a kraje, mapy sesuvů pro kraje a odborná vyjádření), týkající se agendy svahových nestabilit zajišťuje Česká geologická služba, Brno. (<http://www.geology.cz/svahovenestability/registr>).

Registr svahových nestabilit ČGS je zpřístupněn formou mapové aplikace '*Registr svahových nestabilit ČGS*' a jednotlivé záznamy jsou přístupné též vyhledáváním v databázi svahových nestabilit České geologické služby. Registr sesuvů ČGS – Geofundu je rovněž zpřístupněn pomocí mapové aplikace '*Registr sesuvů - Geofundu*', které spolu vytvářejí informační základnu o svahových nestabilitách na území České republiky. Registr sesuvů Geofundu ukončil svou činnost k 31.12.2010 a obsahuje celkem 9 323 záznamů - objektů.

Obě dvě mapové aplikace jsou spojeny a zpřístupněny pomocí mapové aplikace '*Mapa svahových nestabilit České republiky*'. (<http://www.geology.cz/svahovenestability/registr>).

Aktuální výskyt registrovaných sesuvů na území České republiky je znázorněn na (Obr. 4).



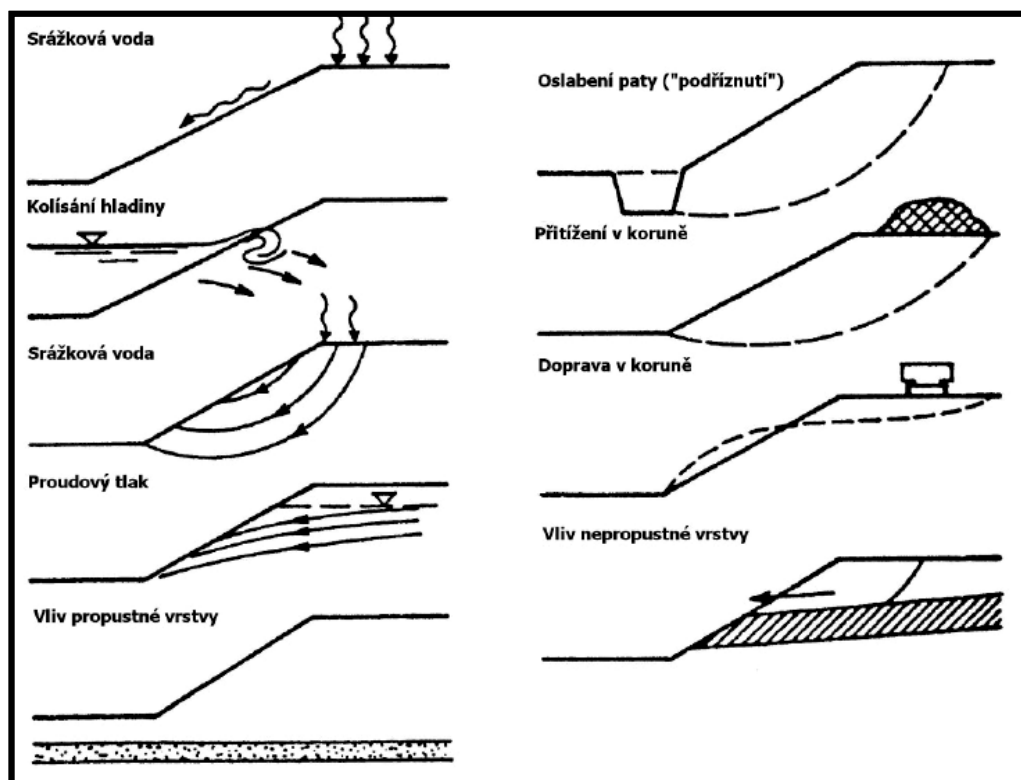
Obr. 4: Výskyt registrovaných sesuvů na území České republiky. ([http://mapy.geology.cz/svahove\\_nestability/](http://mapy.geology.cz/svahove_nestability/)).

## 2.2. Sesuvy

Základním dílem o sesuvech v českém jazyce je učebnice Q. Záruby a V. Mencla: *Sesuvy a zabezpečování svahů*, kde je možné o tomto geodynamickém fenoménu získat podrobnější informace.

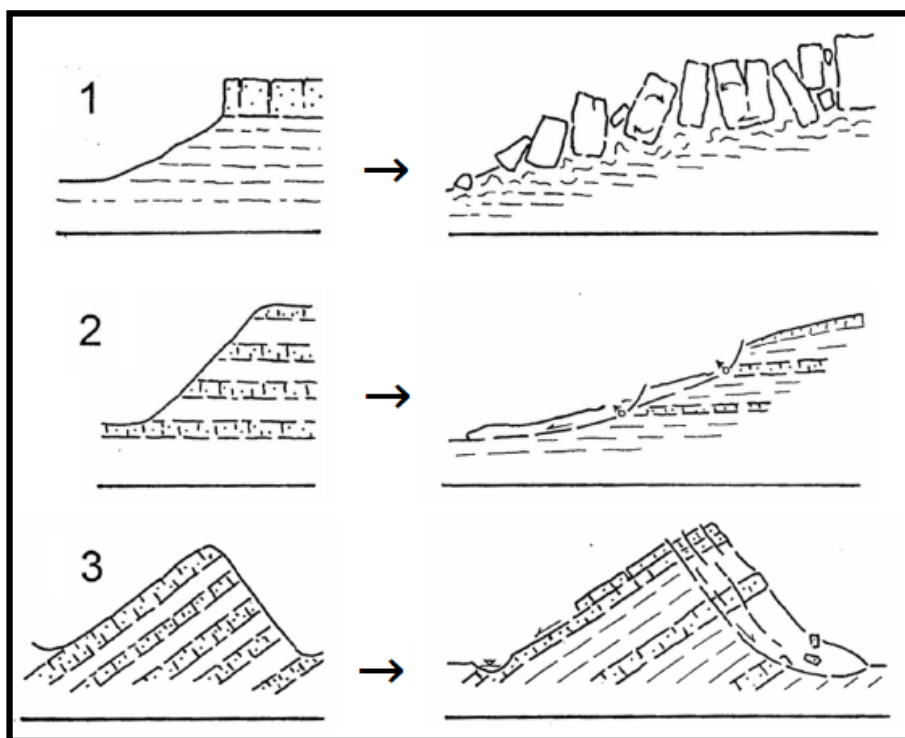
Nejčastějším typem svahových deformací jsou **sesuvy** (vysvětlení pojmu viz. kap. 2.1.2. *Klasifikace svahových pohybů a svahových deformací*). V české terminologii se pod názvem sesuv rozumí jak vlastní pohyb hornin, tak i výsledný morfologický tvar vzniklý deformací svahu sesuvným pohybem. (Rybář et al., 1971).

Vybrané spouštěcí mechanismy sesuvů jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5: Vybrané spouštěcí mechanismy sesuvů (Rybář et al., 1971)

Sesuvné jevy vznikají v určitých geologických poměrech, ty zvláště vhodné jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 6).

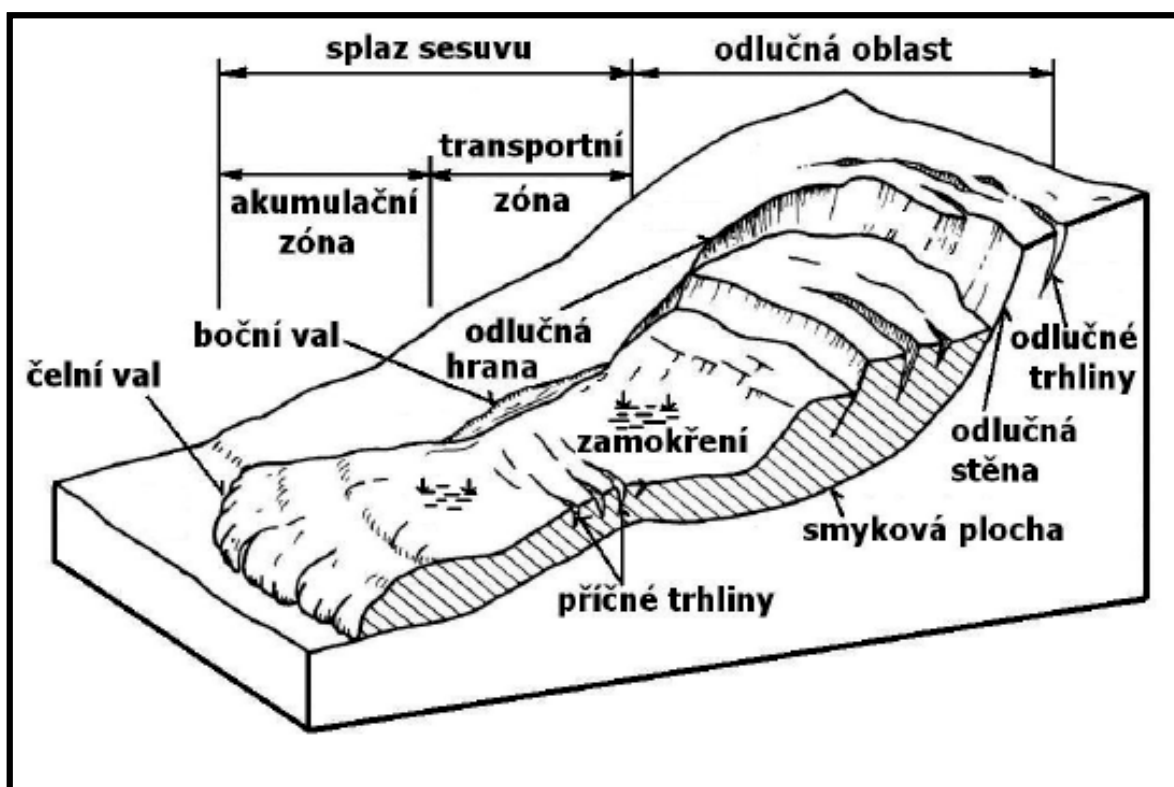


Obr. 6: Geologické úložné poměry zvláště vhodné pro vývoj sesuvů. (Rybář et al., 1971).

Mezi laickou veřejností je obecně pro různorodé svahové nestability a jejich projevy používán termín „sesuv“, který je však pouze jednou z mnoha výsledných forem svahových pohybů. (Hanzlíček et al., 2006).

### 2.2.1. Části sesuvu

Jednotlivé části sesuvu jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 7).



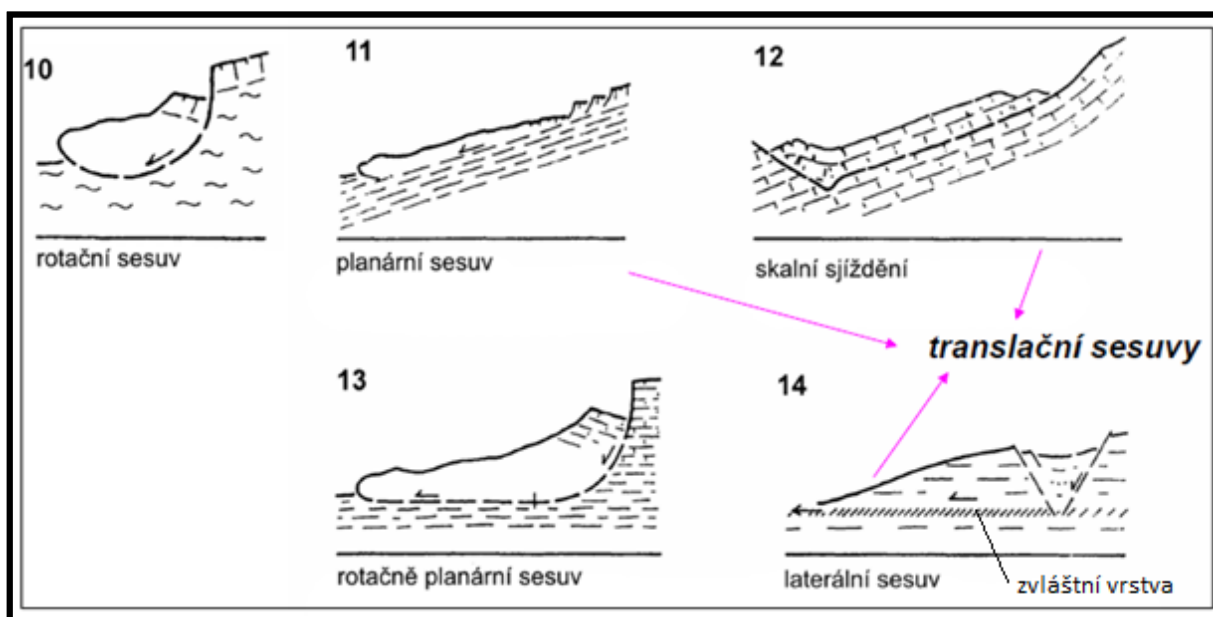
Obr. 7: Pojmenování jednotlivých částí sesuvu. (Záruba, Mencl, 1974).

### 2.2.2. Druhy sesuvů

Druhy sesuvů podle Rybáře et al. (1974) jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4) a k tomu náležející obrázky jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 8).

Tab. 4: Klasifikační schéma svahových pohybů pro skupinu sesouvání. (Rybář et al., 1971).

Skupina svahových pohybů	Základní typy svahových pohybů	Příklady nejrozšířenějších typů a jejich charakteristika	Číslo příkladu	Rychlost svahových pohybů	Používané názvy výsledných svahových deformací	Převládající mechanismus
sesouvání	sesouvání podél rotační smykové plochy		10	až v m/h	- rotační sesuvy - sesuvy podle rotační smykové plochy	klouzavý pohyb
	sesouvání podél rovinné smykové plochy	sesouvání zemin podél rovinné smykové plochy	11		- planární sesuvy - sesuvy podle rovinné smykové plochy - sesuvy podle předurčené (predisponované) smykové plochy	
		sesouvání skalních hornin podél rovinné smykové plochy	12	až v 10 km/h	- planární sesuvy ve skalních horninách - sjíždění po předurčené ploše - skalní sjíždění	
	sesouvání podél složené smykové plochy	sesouvání podél složené zakřivené a rovinné smykové plochy	13	až v m/h	- rotačně planární sesuvy - sesuvy podél složené smykové plochy	
		sesouvání podél soustavy rovinných ploch	14		- laterální sesuvy - translační sesuvy	



Obr. 8: Výsledné svahové deformace pro skupinu sesouvání. (Rybář et al., 1971).

- *sesouvání podél rotační smykové plochy* (rotační sesuvy) – vytvářejí se v homogenních jílovitých horninách v pahorkatinách a nížinných oblastech na březích řek, jezer a moří;
- *sesouvání zemin podél rovinné smykové plochy* - smyková plocha předurčena, geologické nebo tektonické rozhraní (nejčastěji rozhraní mezi podkladem a pokryvnými útvary), planární sesuvy;



- *sesouvání skalních hornin podél rovinné smykové plochy* - probíhá konformně se svahem. Jde o vrstevní plochu, břidličnatost nebo tektonickou zlomovou plochu. Planární sesuvy ve skalních horninách;
- *sesouvání podél složené zakřivené a rovinné smykové plochy* (rotačně planární sesuvy) – vyskytují se zejména v horizontálně uložených jílovitých, prachovitých a slinitých sedimentech;
- *sesouvání podél soustavy rovinných ploch* - vystupuje při patě svahu a odlišuje se svými fyzikálně mechanickými vlastnostmi od hornin v nadloží. Vznik **laterálních sesuvů** s charakteristickými formami. V odlučné oblasti příkop, střední část sesutého svahu se posunuje jako souvislý blok, v předpolí se vytlačuje val. (Rybář et al., 1974).

Sesuvy laterální – jejich zvláštní vrstva (zóna) je tvořena (Rybář et al., 1971):

- a) horninami s extrémně nízkými smykovými parametry;
- b) citlivými (sensitivními) jíly;
- c) písky náchylnými ke ztekucení;
- d) predisponovanou plochou (nebo zónou) porušení;
- e) pružně reagující kompetentní vrstvou, schopnou koncentrovat horizontální napjatost v masivu.

### 2.2.3. Ohrožení sesuvem

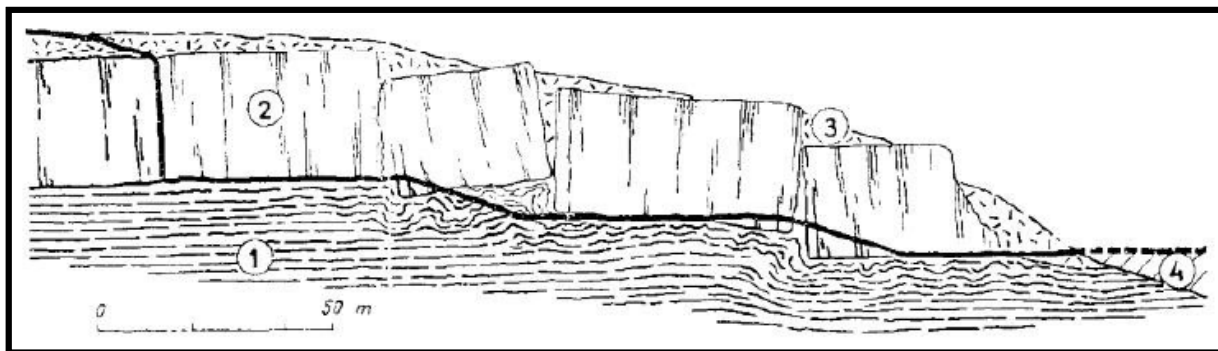
Sesuvy mohou dle Záruby, Mencla (1987) ohrozit:

- jednotlivá obydlí i celá sídliště;
- zemědělské i lesní pozemky, ztížit jejich obdělávání;
- provoz lomu a těžbu nerostných surovin;
- stavby komunikační (silnice, železnice...) způsobují zdržení stavby, zvýšení stavebního nákladu i přerušení provozu;
- tunelové stavby;
- vodovodní, kanalizační, plynovodní řády, telefonní a elektrická vedení; subakvatické skluzy přerušují podmořské kabely;
- vodohospodářské stavby, zvláště staveniště přehrad;
- plavební a derivační kanály a tlaková potrubí do hydrocentrál;
- mohou zahradit údolí, vytváří dočasná hrazená jezera, která ohrožují záplavami dolní povodí;
- mohou způsobit ničivé vlny v jezerech a mořských zátokách;
- mohou zkrátit životnost nádrže zanášením nebo sesouváním břehů;
- mnohdy ohrožují i životy lidí.

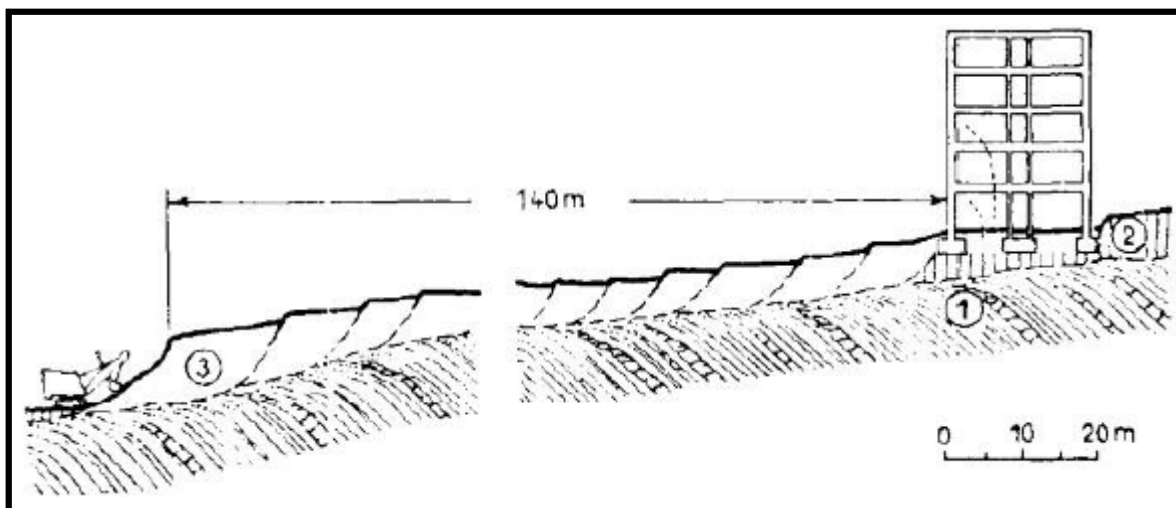
Zemědělské pozemky porušené sesouváním půdy nelze dobře obdělávat a ztrácejí proto na své hodnotě. Nepravidelné zvlnění povrchu a hluboké trhliny ztěžují všechny zemědělské práce a zejména nelze dobře použít strojní mechanizace. Sesouváním bývají podstatně změněny půdní poměry, neboť svahovými pohyby může být úrodná povrchová vrstva půdy shrnuta a na povrch se dostanou neúrodné spodní polohy. Při větších pohybech nelze pozemky využít ani jako pastviny, protože trhliny, částečně zakryté vegetací, jsou nebezpečné lidem i dobytku. (Záruba, Mencl, 1987).

Lesy narušené svahovými pohyby poskytují podstatně nižší výnosy a méně hodnotné dříví. Rozrušením povrchu území je velmi ztížena těžba i doprava dříví. Jde-li o rozsáhlejší svahové pohyby, bývá porost zcela zničen, stromy jsou vyvráceny nebo usychají. Obnova lesních porostů na zamokřených jílovitých půdách je velmi obtížná a úspěšné vysazení nového porostu zpravidla předpokládá nákladné odvodnění sesuvného území a jeho celkovou rekultivaci.

Sesuvy ztěžují práci v lomech a naopak nesprávně založené a neodpovědně provozované lomy mohou ohrozit stabilitu celého svahu. Již v dávné minulosti byly takto způsobeny katastrofální sesuvy. Např. provoz čedičových lomů v Českém středohoří je ztížen tím, že okrajové čedičové kry jsou pokleslé do měkkého podloží (Obr. 9). Při založení lomu v zapadlé kře je třeba postupně zvedat základnu lomu do vyšší úrovně. Výškové rozdíly jsou pro provoz lomu nepříznivé a musí se překonávat svážnými drahami. Při těžbě na úpatí svahu (Obr. 10) může dojít vlivem podkopání k porušení stability svahu, což ohrožuje stavby nad těžebním místem. Musí se proto podchytit základy postiženého objektu a zastavit těžbu.

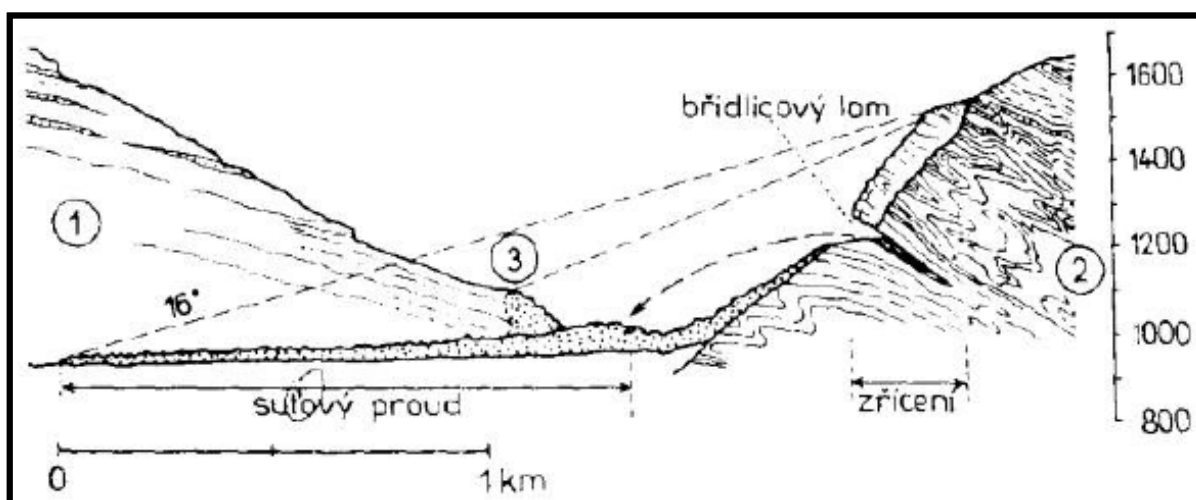


Obr. 9: Zabořené okrajové kry čedičového proudu (2) do křídových slínů (1). (Záruba, Mencl, 1987).



Obr. 10: Nesprávná těžba na úpatí svahu dala podnět k sesuvu, který ohrozil stabilitu budovy. Jílovité břidlice a pískovce flyšového pásma (1), svahové hlíny a suti (2), hlíny a suti porušené sesouváním (3). (Záruba, Mencl, 1987).

Také na obrázku (Obr. 11) je znázorněno zřícení skalního materiálu, které ohrožuje plochu pod ním (domy, lidi apod.).



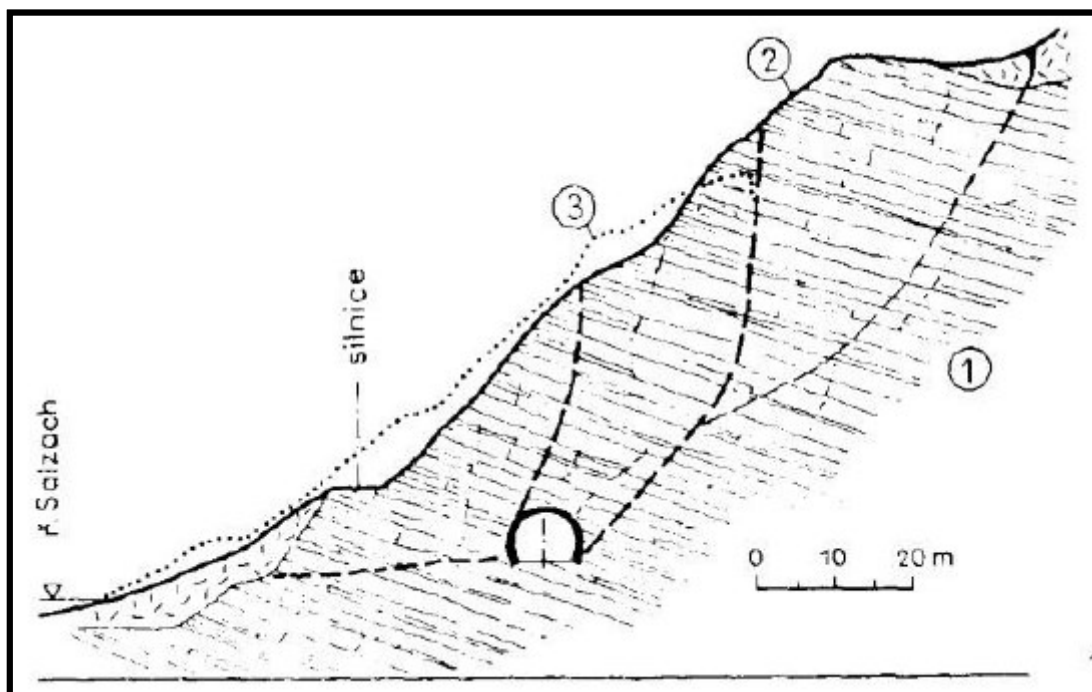
Obr. 11: Zřícení horského úbočí způsobené podkopáním strmého svahu lomem. (Upraveno podle Záruby, Mencla, 1987).

Silnice vedené v územích náchylných k sesouvání bývají často porušeny jak přírodními, tak umělými sesuvy, byla-li při jejich stavbě porušena stabilita svahu. K prvním případům náleží silnice do Dnebohu u Mnichova Hradiště, silnice u Handlové apod. Sesuvy jednak přímo ohrožují dopravu a provoz na silnicích, jednak velmi zvyšují náklady na udržování.

Velmi závažným problémem jsou sesuvy pro železniční dopravu, a to jak při projektování a stavbě železnic, tak i za provozu. V územích náchylných k sesouvání je třeba již při návrhu trasy pamatovat na to, aby hlubokými zářezy nebo vysokými náspy nebyla dotčena stabilita území, a mnohdy i stavební postup je třeba přizpůsobit nepříznivým vlastnostem hornin. Při provozu pak v úsecích ohrožených sesuvy bývá nutno nařídit pomalou jízdu a zařídit trvalou službu k pozorování sesuvných pohybů a pro udržování zabezpečovacích opatření. To velmi zvyšuje provozovací náklady. Sesuvy vedou někdy i k dočasnému přerušení trati na dobu potřebnou k provedení sanačních prací, někdy až k úplnému opuštění trati, u nás např. železniční trať Žabokliky-Březno na svazích údolí řeky Ohře na Žatecku (postavena r. 1873 a opuštěna r. 1879). (Záruba, Mencl, 1987).

Dalším případem ze současné doby je masivní sesuv asi 500 tisíc m<sup>3</sup> zeminy na trase dálnice D8 u Litochovic v Českém středohoří na km 56,5. Sesunutý svah o šířce dvou set metrů a délce téměř půl kilometru zavalil kromě kolejí také poslední budovaný úsek dálnice D8. K sesuvu došlo 7. června 2013. Sanace území zasaženého sesuvem bude finančně velice náročná a dle předběžných odhadů geologů by ani poté nebylo jisté, zda k sesuvu nedojde znovu. Je otázkou, kudy jinudy (již postavenou, avšak sesuvem poškozenou) dálnici vést. (Česká geologická služba).

Svahovými pohyby mohou být dále ohroženy tunely (Obr. 12), staveniště údolních přehrad. Ohrožení staveniště hráze sesuvy nastává zejména při výlomu pro základy.



Obr. 12: Příčný profil sesutým svahem nad železničním tunelem. Chloritické břidlice (1), povrch území před sesutím (2), povrch území po sesutí (3). (Upraveno podle Záruby, Mencla, 1987).

Závažná je otázka stability svahů při stavbě plavebních a derivačních kanálů. Kanálové stavby vyžadují často hluboké zásahy pod povrch území a tím způsobují rozsáhlé sesuvy, které někdy ohrožují i funkci kanálu.

Tlaková potrubí, kterými se přivádí voda do hydrocentrál, mohou být také ohrožena sesuvy nebo svahovými pohyby. (Záruba, Mencl, 1987).

Velké sesuvy v horských údolích způsobují mnohdy dočasné zahrazení údolí a vznik hrazeného jezera. Hráze vytvořené sesutými hmotami nejsou dostatečně pevné a zpravidla po prvním přelití vodou se protrhnou a způsobují katastrofální záplavy. Mnohá hrazená jezera byla postupně zanesena splaveninami a v podélném profilu vodních toků vznikly pak stupně vytvořené akumulací údolních náplavů. V některých místech se tyto stupně zachovaly dodnes, v některých byly náplavy novou erozí vyklizeny a zůstaly zachovány jen zbytky jezerních náplavů na svahu. Oba tyto případy jsou velmi nepříznivé pro stavbu přehrad.

K řadě nebezpečných sesuvů také došlo při umělém snižování hladiny starých jezer, která byla zapojována na nově budovaná vodní díla k využití vodní energie. V takových případech dojde k sesouvání břehů, které může způsobit bouřlivé vlnobití. (Záruba, Mencl, 1987).

Životnost některých nádrží byla ohrožena sesouváním břehů, které může způsobit rychlé zanášení a tím zmenšení užitečného prostoru. Týká se to hlavně údolí, kde svahy jsou porušeny starými sesuvy nebo jsou náchylné k sesouvání.

Z výše uvedených příkladů je patrné, jak závažné ekonomické důsledky mají tyto procesy pro jakékoliv stavební a inženýrské práce, pro sestavení územních a zastavovacích plánů, pro trasování komunikací i pro vodohospodářské stavby, a to zejména tehdy, když se nerespektuje náchylnost území k sesouvání ať již z neznalosti, nebo že se podceňuje. Daly by se vyčíslit veliké částky vynaložené na sanaci zaviněných sesuvů právě tak, jako velké částky uspořené včasným odhalením nestabilních svahů v oblasti projektovaných inženýrských staveb. (Záruba, Mencl, 1987).

#### **Typy ekonomických ztrát v důsledku sesuvů dle Dikau (1996):**

- přímé škody (např. poničení komunikace);
- dlouhodobě se vyvíjející škody (např. ztráta úrodnosti půdy);
- nepřímé výdaje (plánování atd.).

#### 2.2.4. Metody průzkumu sesuvů

Rybář et al. (1971) uvádí následující metody průzkumu sesuvů:

##### 1) *předběžné práce:*

- prohlídka terénu;
- ústní sdělení obyvatel;
- studium archivních podkladů;
- hypotetický myšlenkový model;

##### 2) *průzkumné práce:*

- IG mapování;
- sestavení řezů;
- odkryvné práce;
- laboratorní zkoušky;

##### 3) *stanovení hloubky smykové plochy;*

##### 4) *kontrolní sledování:*

- měření deformací;
- sledování stavu zvodnění;
- měření napjatosti;
- nepřímé metody;

##### 5) *metody prognózy:*

- prostorová prognóza;
- prognóza mechanismu a rozměrů porušení;
- časová prognóza.

### 2.3. Základní typy opatření - sanace

Při rozhodování o použití některé ze sanačních metod je kladen důraz zejména na typ svahové deformace, její hloubkový i plošný rozsah, objekt, který je svahovými pohyby ohrožen, příčina vzniku nebo skutečnost, zda k pohybům dochází ve skalním nebo zemním masivu. Hlavní pozornost inženýrského geologa je zaměřena k tomu, jak vzniku sesuvných pohybů zabránit, nebo tam, kde již k sesouvání došlo, jak svah stabilizovat. Nejlepším opatřením je, vyhneme-li se sesuvnému území. To je možné jen někdy. Vždy je však nutné, abychom se snažili omezit zásah do území na nejmenší míru, provedli pečlivý průzkum a navrhli příslušná opatření.

Zjištění příčiny svahového pohybu a následně její odstranění je ideálním výsledkem. (Lee et al., 2004).

Pokud je to možné, tak nezasahovat stavební činností do potencionálně nestabilních svahů a stěn. V sesuvném území nestavět. (Lee et al., 2004).

K *prvním záchranným* opatřením při sesuvech patří dle Goodmana (1993):

- zachycení a odvedení povrchové vody přitékající k sesuvnému území nebo vyvěrající v odlučné oblasti;
- velmi účinné je vyčerpání vody ze všech studní na sesuvném území a odvést ji z bezodtokých depresí;
- zaplnění všech otevřených trhlin, do kterých by mohla přitékat povrchová voda.

Po realizaci sanace musí následovat vyhodnocení účinnosti sanace a to na základě (Goodman, 1993):

- stabilitních výpočtů;
- měření monitorovacího systému.

*Sanační metody* je možno dle Goodmana (1993) rozdělit podle principu realizace a způsobu působení:

- úprava geometrie svahu;
- odvodnění svahu (povrchové, hloubkové, drenážní žebra);
- technická stabilizační opatření;
- zlepšování vlastností hornin a zemin na svahu;
- ochrana svahu před zvětráváním a erozí;
- zvláštní opatření.

#### **A) Úprava geometrie svahu**

Zmenšením hmotnosti hornin v odlučné oblasti nebo zvětšením hmotnosti v akumulární oblasti existujícího nebo očekávaného sesuvu se stabilita svahu zvětší. Výhodou je, že je možné k němu přistoupit okamžitě, bez předcházejících, časově náročných průzkumných prací. (Turner et al., 1996).

Sanační metody založené na úpravě tvaru svahu se dle Turnera et al. (1996) realizují jako:

- přitížení násypu;
- odlehčení svahu;

- zmírnění sklonu svahu;
- přemístění materiálu z odlučné části do akumulární části;
- odstranění sesuvných mas.

## ***B) Odvodnění svahu***

Odvodněním, jako jedním z nejdůležitějších sanačních prvků, se docílí např. zmenšení pórového tlaku vody na smykové ploše a tím snížení aktivních sil. Během srážek se voda dostává do přirozených kolektorů vsakem nebo se zachytává v přítomných trhlinách, odkud dále proniká do masivu, kde může působit jako faktor, snižující stabilitu svahu.

V zásadě jde o dva způsoby odvodnění (Záruba, Mencl, 1987):

- povrchové;
- podpovrchové.

### Povrchové odvodnění

Negativním vlivům na stabilitu svahu v přípovrchové zóně lze zabránit **povrchovým odvodněním** svahu (Obr. 18). K okamžité sanaci se využívají prosté rýhy po spádnicí, částečně stabilizované nebo uklidněné sesuvy se odvodňují systémem vodotěsných dlážděných příkopů, rigolů a drenáží, utěšňují se trhliny, svah se překrývá fólií, vytváří se nepropustný bitumenový pokryv. Odvodňovací zařízení se musí pravidelně kontrolovat a udržívat. Zaústěno bývá do povrchové vodoteče nebo stávající kanalizace.

Vedle povrchové sítě příkopů na vlastním sesuvném území se někdy zřizují **příkopy nad odlučnou oblastí**, které mají za úlohu zachytit a odvést vodu přitékající z okolí do ohroženého území. Obvodové příkopy jsou vydlážděny nepropustným materiálem. (Záruba, Mencl, 1987).

### Podpovrchové odvodnění

Podpovrchové odvodnění (Obr. 13 - Obr. 15, Obr. 17, Obr. 18 a Obr. 22) patří k velmi účinným prostředkům na zvětšení stability svahu. Jeho nevýhodou je, že ho můžeme spolehlivě navrhnout až po skončení geologického a hydrogeologického průzkumu.

K hloubkovému odvodnění slouží systémy odvodňovacích vrtů. Správnou funkci vertikálních a šikmých vrtů zajistí jejich dosah, a to až do propustné vrstvy v podloží smykové plochy. Jsou-li horizontální vrty vybaveny perforovanou pažnicí, lze takový vrt propláchnout tlakovou vodou, a zabránit tak jeho zanesení a tím také snížení jeho funkčnosti. Účinnost vrtů lze zvýšit vybudováním šterkových pilot nebo podzemních stěn vyplněných šterkem. Do drenážních



studní (Obr. 13) se voda z okolního masivu stahuje systémem horizontálních vějířovitých vrtů. Ze studny se voda následně odvádí do povrchového toku např. dalším horizontálním vrtem, žebry, kanalizací atd. (Záruba, Mencl, 1987).

K odvodňování se využívají drenážní trubky, jejichž výhodou může být, jsou-li ve své horní části perforované. Je lepší, aby spodní část děrovaná nebyla, protože po ní voda odtéká. Kanalizační trubky perforování nemají, jejich funkcí je pouze odvod vody.

Méně častým způsobem hloubkového odvodnění je elektroosmóza, a to například v málo propustných, zvodněných zeminách (jílovité hlíny, hlíny, prachovité zeminy). Pokud se do takových zemin zavede stejnosměrný proud, začne se uvolňovat velké množství vázané vody, která se může následně ze zeminy čerpat. (Hulla et al., 1998).

Pro mělkou drenáž se používají drenážní žebra v rýhách 1–2 metry hlubokých, vykopaných po spádnicí a často také vybavených geotextilií a drenážním potrubím. Spolu s hlouběji uloženými žebry zlepšují také odpor proti usmýknutí.

Zcela ojedinělý drenážní prvek představují ražené odvodňovací štolý, které se obvykle kombinují s drenážními vrty.

### ***C) Technická stabilizační opatření***

Tato opatření zabezpečují nebo zvyšují stabilitu svahu v zeminách i skalních horninách. Využívají k tomu zabudování umělých nosných a zpevňujících prvků (Záruba, Mencl, 1987).

Mezi technická stabilizační opatření (Obr. 13 – Obr. 22) zařazuje Hulla et al. (1998) různé opatření technického charakteru, jako například:

- *Opadové stěny a galerie* - ke klasickým technickým opatřením se řadí opadové stěny nebo galerie, sloužící k zabezpečení provozu stavebního díla pod svahem. Opadové stěny stabilitu svahu sice nezvyšují, zachycují však padající úlomky hornin. Sekundárním stabilizačním faktorem je přitížení a podepření paty svahu. Podmínkou správné funkce je pravidelné čištění akumulčního prostoru za opadovou stěnou.

Galeriemi se chrání především liniové dopravní stavby a potrubní vedení na exponovaných svazích v horském terénu. Galerie částečně podepírá svah a částečně překrývá komunikaci.

- *Stabilizační žebra*.
- *Zárubní a opěrné zdi* (Obr. 17 a Obr. 22) - zárubními a opěrnými zdmi se zabezpečuje čelo sesuvu a svahy zářezů nad komunikacemi a zástavbou tehdy, není-li možné upravit je do stabilních sklonů. Zatímco dříve se jednalo o masivní konstrukce, v současné době

se přistupuje k tenkostěnným zdem, které mohou být založeny na pilotách nebo se kotví do horninového masivu. Používají se k tomu prutové nebo lanové kotvy.

Prefabrikované kotvené stěny se umísťují tam, kde nelze postavit holé vysoké opěrné a zárubní zdi. Prvky, montované s odskokem, se po dokončení výstavby naplní zeminou a osadí vegetací.

Stále rozšířenější jsou *gabionové stěny* (Obr. 16 a Obr. 18), drátěné koše plněné kamenivem. Střídavě se na sebe kladou a vytvářejí opěrnou konstrukci, která se časem může zanést zeminou a zarůst vegetací. Gabiony lze snadno přizpůsobit nepravidelnému povrchu, kladou vysoký odpor tlakovému i tahovému namáhání, jsou propustné a při jejich aplikaci lze případně využít místní materiál.

- *Geomříže* (Obr. 19) a *geotextilie* (Obr. 20).
- *Kotvení skalních stěn* - je-li skalní stěna narušena průběžnými plochami diskontinuit, které jsou orientovány na směr vytvářené skalní stěny, využívá se jako hlavního stabilizačního prvku kotev (Obr. 21), které umožňují přenášet sílu do horniny. Při navrhování stabilizace kotvami je potřeba brát v úvahu délku kotev a spolehlivý přenos sil z hlav kotev na okolní horninu.
- *Pilotové a podzemní stěny* - Ochranu významných komunikací zajišťují velkopřůměrové pilotové stěny. Zhotovují se nejčastěji vrtáním s následným vložením armatury a vyplněním betonovou směsí. Spojují se trámcem a mohou být ukotveny hluboko pod smykovou plochu. Pilotová stěna nesmí tvořit hráz přirozenému proudění podzemní vody, musí být dokonale odvodněna.

Pro sesuvy s mělkou smykovou plochou (max. 3 – 4 m) se s úspěchem využívají mikropiloty. Do maloprofilového vrtu se vloží ocelová trubka a kořen mikropiloty se zainjektuje cementovým mlékem. Podobně se budují mikrozápory, kdy se do vrtu vkládá místo ocelové trubky I-profil.

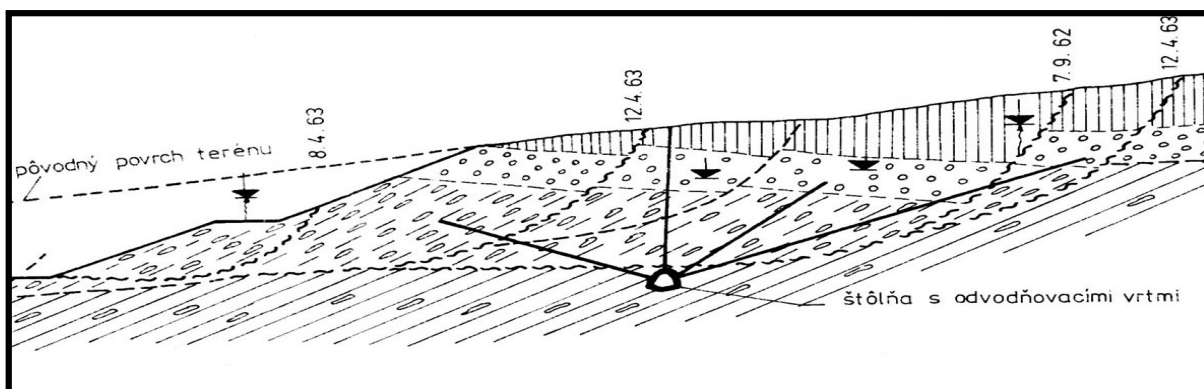
Výhodou pilotových stěn je, že mohou být postaveny již v předstihu před zásahy do tělesa sesuvu (vyhloubením zářezu).

Hluboké výkopy se paží monolitickými podzemními stěnami. Stejně jako pilotové stěny, mohou být i podzemní stěny vybudovány ještě před započítím výkopu. Je-li podzemní stěna kvalitně ukotvena, zemní masiv se již při výkopech nedeformuje, což umožňuje budovat hluboké stavební jámy i v bezprostřední blízkosti starší zástavby.

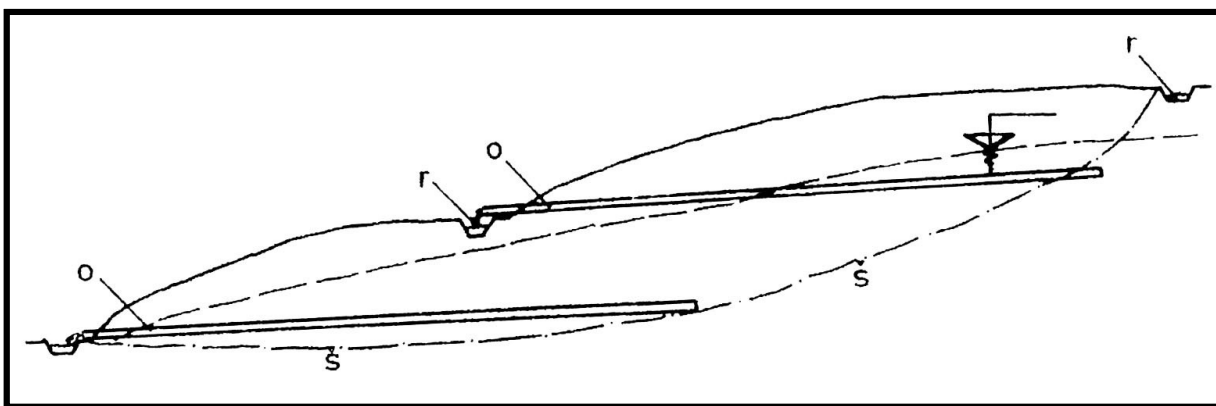
### Ukázky technických stabilizačních opatření:



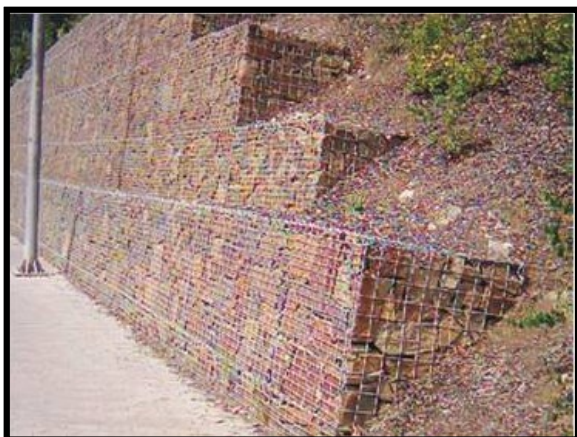
Obr. 13: Drenážní studna – vyvedení horizontálních vrtů. Podpovrchové odvodnění. (Hulla et al., 1998).



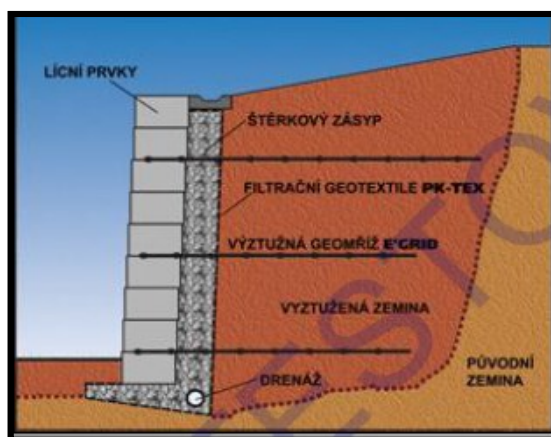
Obr. 14: Kombinace odvodňovací štol a odvodňovacích vrtů. Podpovrchové odvodnění. (Turner et al., 1996).



Obr. 15: Horizontální vrtů. Podpovrchové odvodnění. (Turner et al., 1996).



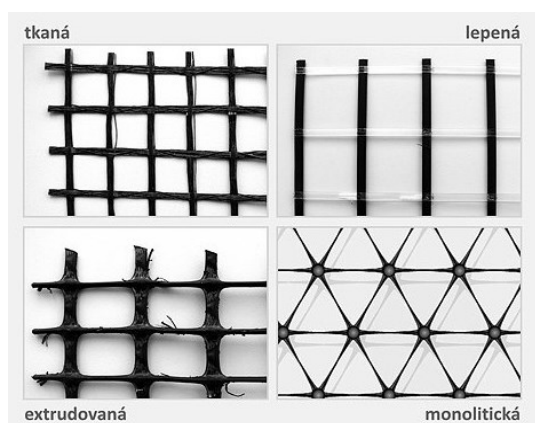
Obr. 16: Gabionová stěna – pohled z boku.  
Ostrava – Zábřeh. (Poledňák, 2013).



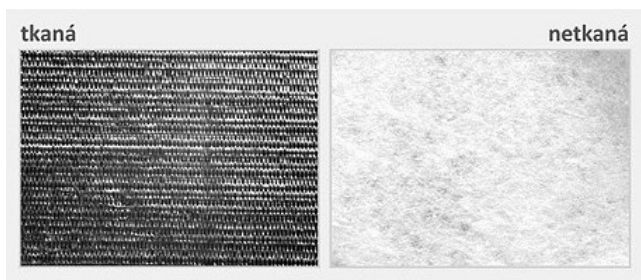
Obr. 17: Opěrná zeď. (Poledňák, 2013).



Obr. 18: Kombinace stabilizačních prvků – podpovrchové odvodňovací vrty v gabionové stěně a povrchové odvodnění – Jistebnice (Poledňák, 2013).

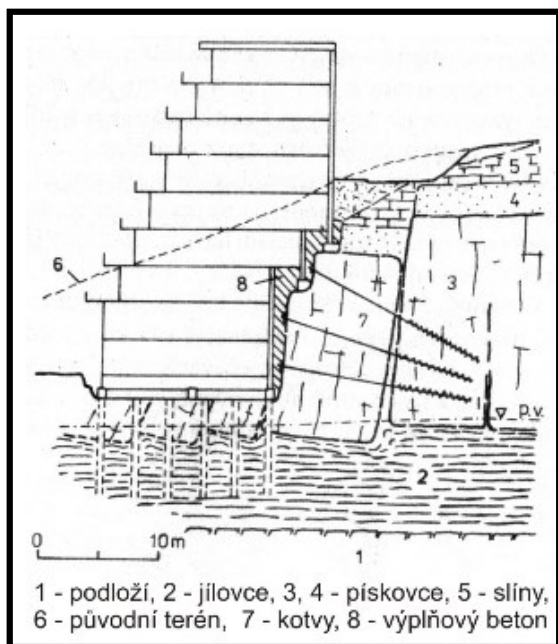


Obr. 19: Typy geomříží. (Poledňák, 2013).

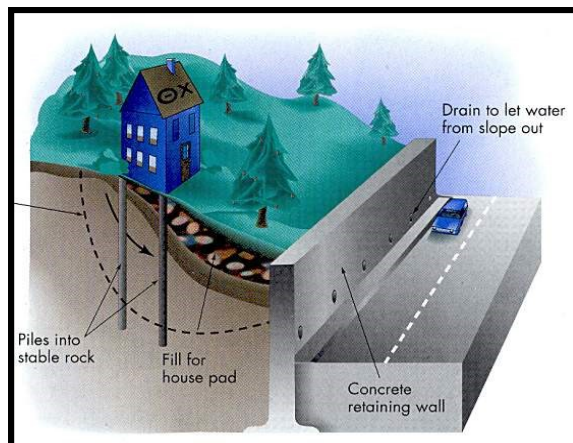


Obr. 20: Typy geotextilií. (Poledňák, 2013).





Obr. 21: Stabilizace skalní stěny.  
(Záruba, Mencl, 1987).



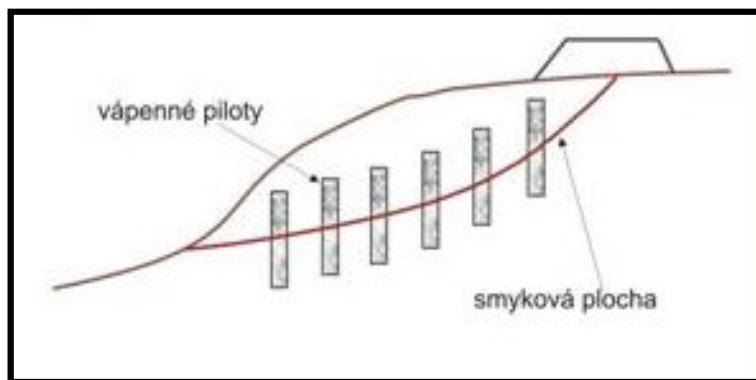
Obr. 22: Piloty, opěrná zeď, odvodnění.  
(Poledňák, 2013).

#### ***D) Zlepšování vlastností hornin a zemin na svahu***

Zpevňováním hornin se docílí zvýšení jejich smykové pevnosti a následně růstu pasivních sil. K tomu slouží především injektování. Zřídka se používá tepelné zpevňování zemin spalováním nafty nebo plynu v zapažených vrtech, elektrochemické zpevňování, rozrušení již vzniklých kluzných ploch odpalem náloží trhavin ve vrtu (jen s dočasným účinkem).

Při výjimečně používaném zmrazování zemin se chladicí látka do zeminy vpravuje trubkami, které obvykle sahají do hloubky ne větší než 10 m, čímž je předurčen hloubkový dosah této metody. (Schuster et al., 1978).

V případě měkkých jíľ se do nich pro zvýšení únosnosti a urychlení konsolidace přidává nehašené vápno ve formě vápenných pilot (Obr. 23). Tyto zároveň pomáhají snižovat vlhkost a zvyšovat pevnost právě jemnozrnných zemin. Do vrtů hlubokých maximálně 10 m se dutým soutyčím vhání pod tlakem práškové vápno. Pevnost takto vytvořené piloty se zvyšuje s postupně probíhajícími chemickými reakcemi. (Schuster et al., 1978).



Obr. 23: Vápenné piloty. (Hulla et al., 1998).

### ***E) Ochrana svahu před zvětráváním a erozí***

Způsob ochrany svahu před zvětráváním a erozí se volí zejména s ohledem na skutečnost, zda je svah tvořen zeminami nebo skalním masivem.

Zhoršení mechanických vlastností zeminového prostředí je možné zabránit výsadbou trav a dřevin, jejichž kořeny prorůstají zeminou, a tak jí zpevňují. Kromě toho také odsávají z podloží vodu. Pro tento účel jsou vhodné listnaté dřeviny s hlubokým kořenovým systémem a velkou spotřebou vody.

Pomoc při zmírňování účinků zvětrávání a eroze poskytují vlnolamy, případně kamenné dlažby pro zpevnění břehů vodních toků a také geomříže.

Odlišné postupy se používají u sklaních stěn. Osvědčily se pláště ze stříkaného betonu, torkretové omítky, kotvené obkladové stěny, geomříže (Obr. 19). (Schuster et al., 1978).

### ***G) Zvláštní opatření***

Pokud by sanace ve fázi přípravy stavby představovala výrazné navýšení nákladů na výstavbu, přistupuje se k opatřením vedoucím ke změně lokality výstavby nebo trasy, svahová porucha se přemostuje, případně se překonává tunelem. (Schuster et al., 1978).

### **3. PŘÍKLADY VÝZNAMNĚJŠÍCH SESUVŮ V ČR A V ZAHRANIČÍ**

Silnice vedené v územích náchylných k sesouvání bývají často porušeny jak přírodními, tak umělými sesuvy, byla-li při jejich stavbě porušena stabilita svahu. K prvním případům náleží silnice do Dnebohu u Mnichova Hradiště, silnice u Handlové apod.

Sesuvy vedou někdy i k dočasnému přerušení trati na dobu potřebnou k provedení sanačních prací, někdy až k úplnému opuštění trati, u nás např. železniční trať Žabokliky-Březno na svazích údolí řeky Ohře na Žatecku (postavena r. 1873 a opuštěna r. 1879). (Záruba, Mencl, 1987).

#### **Dneboh, 1926**

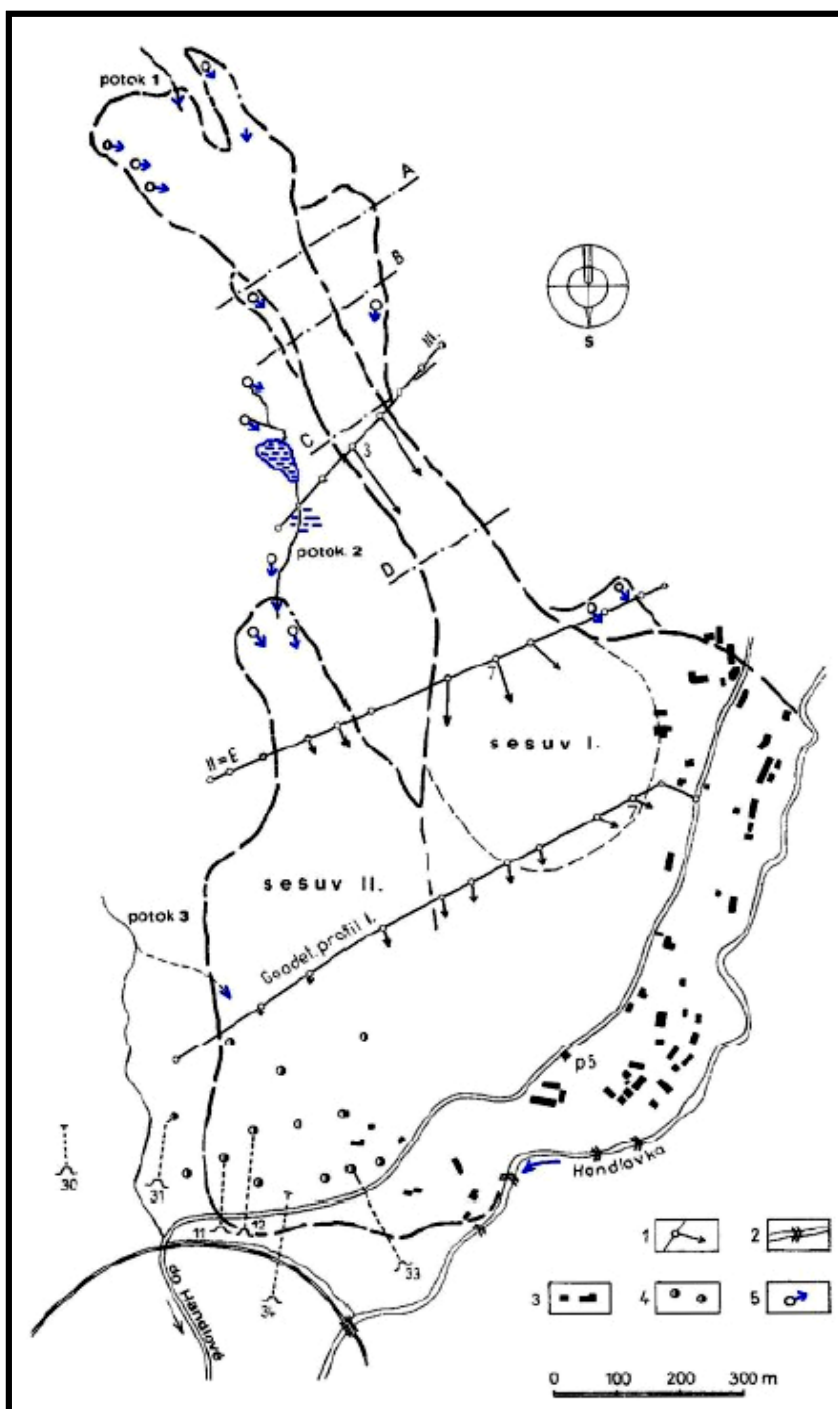
Jednou z největších tragédií byl například sesuv zeminy, který u nás v roce 1926 smetl vesnici Dneboh, která se nachází v oblasti Českého ráje. Tento sesuv byl zapříčiněn vlivem silných dešťů. Uvolnilo se několik milionů kubických metrů svahových sutí, které sjely od vrcholových skalisek až do obce Dneboh, kde došlo ke zničení téměř poloviny vesnice. (Záruba, Mencl, 1929).

#### **Handlová, 1960 – 1961**

Sesuv svahu v Handlové postihl v období mezi 11. prosincem 1960 a 30. květnem 1961 jihovýchodní část slovenského města Handlová. Byl to nejkatastrofičtější proudový sesuv v tehdejším Československu a doposud je největším zaznamenaným sesuvem na Slovensku. Bylo zničeno 150 domů, státní silnice, přírodní řad městského vodovodu, různá dálková vedení a byla ohrožena i železniční trať. Odlučná oblast se vytvořila vysoko na svahu při úpatí andezitových příkrovů v neogenních písčitých jílech a tufitech. Uvolněné zvětraliny a andezitové sutě se sesouvaly ve tvaru úzkého proudu k údolí říčky Handlovka, která byla na několika místech sesutými hmotami zahrazena a vzduta. Celková délka sesuvu byla 1800 m a sesuté hmoty měly objem více než 20 mil. m<sup>3</sup>. (Záruba, Mencl, 1974).

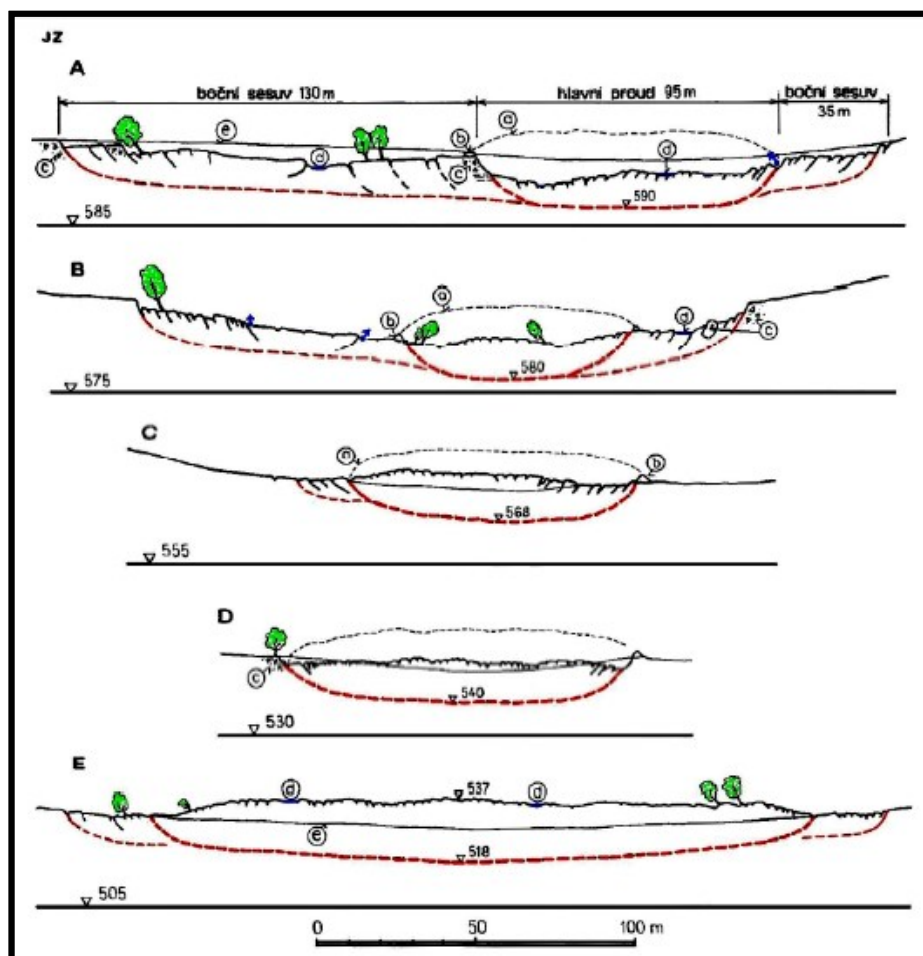
Situace proudových sesuvů a zaměřené příčné profily sesuvem jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 24 a Obr. 25).

Proudové sesuvy na horských svazích s vysoko položenou odlučnou oblastí zaplněnou uvolněnou sutí jsou vážnou překážkou všech komunikačních staveb, neboť jejich sanace je velmi obtížná a nákladná. (Záruba, Mencl, 1987).



Obr. 24: Situace proudových sesuvů u Handlové z r. 1960 – 1961. 1 – pohyb měřených bodů od 1.1. do 31.5.1961, 2 – kamenné stupně zřízené v korytě Handlovky pro omezení zpětné eroze, 3 – rozbořená stavení, 4 – HG vrty, z nichž byla čerpána voda, 5 – význačné prameny v odlučné oblasti. (Záruba, Mencl, 1987).

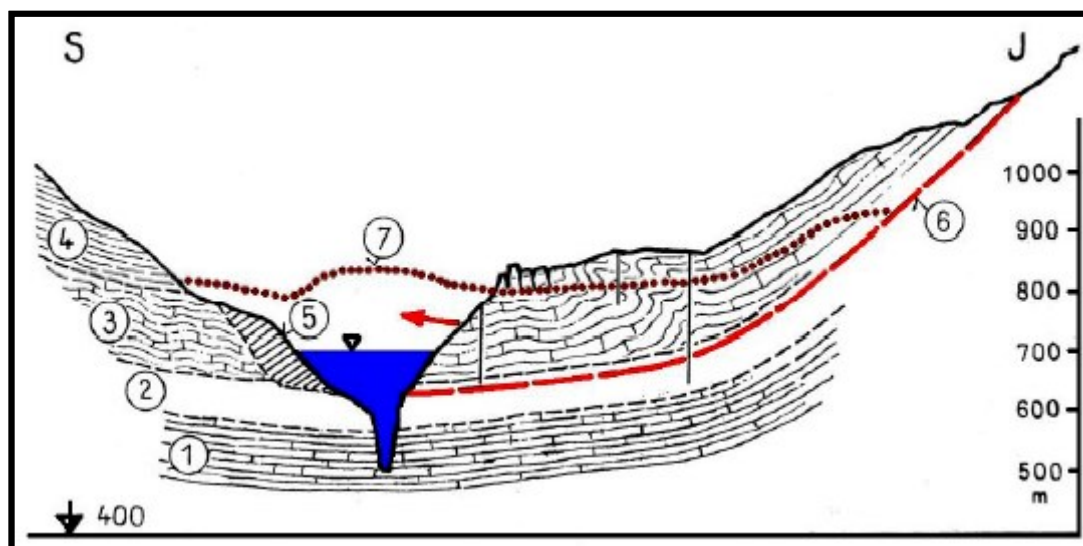




Obr. 25: Zaměřené příčné profily sesuvem u Handlové. A – nejvyšší úroveň sesuvného proudu, b – vytlačené postranní valy, c – andezitové bloky, d – jezírka na povrchu sesuvného proudu, e – původní povrch terénu. (Záruba, Mencl, 1974).

### Vaiont, 1963

Ohromný skalní sesuv jurských vápenců zavalil nádrž Vaiont v italských Alpách a v roce 1963 způsobil katastrofální záplavu v údolí řeky Piave - téměř 100 m vysoká vlna, která se přelila přes hráz a zpustošila území pod hrází. Zahynulo cca 3 000 lidí. (Upraveno dle Záruby, Mencla, 1974). Profil sesuvem do nádrže je zobrazen na obrázku (Obr. 26).



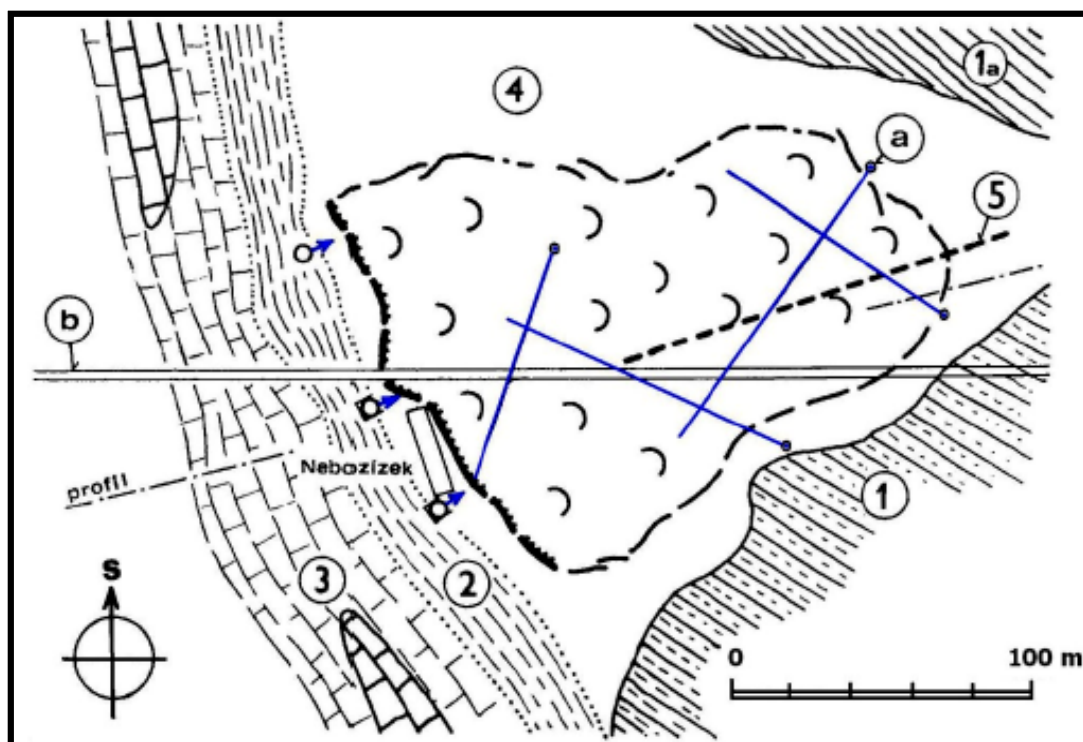
Obr. 26: Schématický profil sesuvem do nádrže Vaiont v r. 1963. 1 – lavicové vápence (digger), 2 – tenké deskovité vápence s jílovitými polohami (malm), 3 – lavicovité vápence s rohovci (křída), 4 – vápence a slíny (křída), 5 – zbytek starého sesuvu, 6 – smyková plocha, 7 – zavalení údolí sesuvem. (Záruba, Mencl, 1974).

### Petřín, 1965

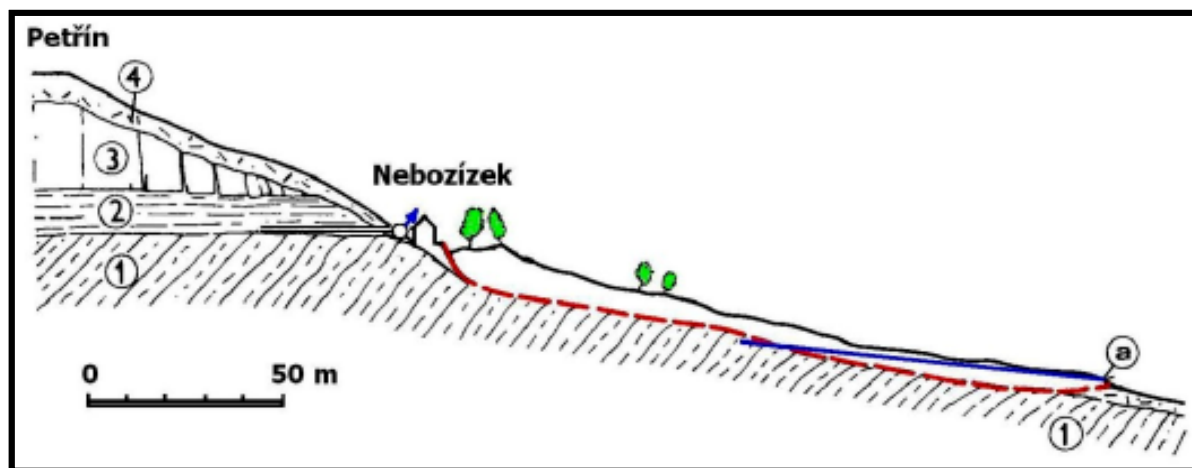
V roce 1965 bylo plošným sesuvem na východním svahu Petřína (Obr. 27) porušeno těleso lanové dráhy. Sesouváním byly postiženy svahové suti a zvětraliny křídových pískovců a jílovců vyplňující depresi, která vznikla v místě význačné tektonické linie tzv. pražského zlomu, podél něhož jsou ordovické břidlice značně porušeny. Smyková plocha probíhá částečně na vyvlečených jílovcích, částečně na povrchu zvětralých břidlic. Sesuv je asi 200 m dlouhý, v horní části 130 m široký, 4 až 8 m hluboký. (Upraveno dle Záruby, Mencla, 1974).

Odlučná oblast se vytvořila pod pramenní linií, kde vyvěrá řada pramenů odvodňujících horizont podzemní vody zadržené v křídových jílovcích (Obr. 28). Podnětem k porušení stability svahu byly jednak zvýšené dešťové srážky v letech 1964 – 1965, jednak zvýšená vydatnost všech pramenů v horní části svahu v souvislosti s netěsností vodovodních a kanalizačních potrubí na strahovské pláni.

Pro zabezpečování území byly nejprve zachyceny povrchové prameny a odvedeny potrubím mimo sesuv. Pak bylo těleso sesuvu a jeho podloží odvodněno několika šikmými vrty podle návrhu V. Mencla. Pro definitivní zajištění území byla zřízena odvodňovací štola, do které byla svedena podzemní voda z povrchu jílovců, jež zásobovala prameny ve svahu. (Upraveno dle Záruby, Mencla, 1974).



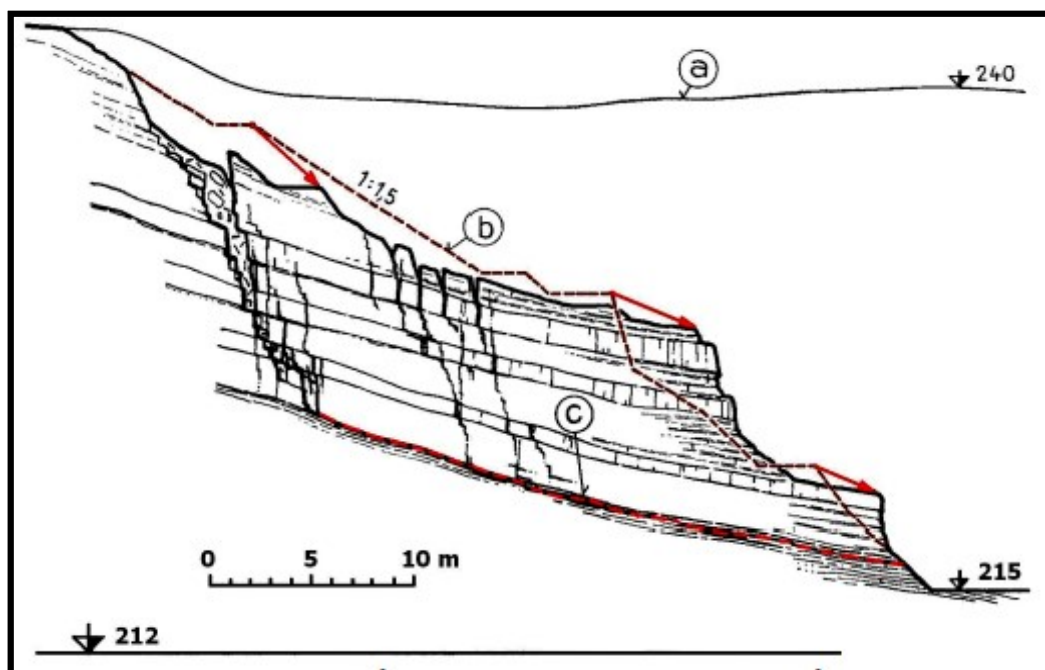
Obr. 27: Situace plošného sesuvu křídových zvětralin a sutí na svahu Petřína. 1 – šárecké vrstvy, 1a – bohdalecké vrstvy, 2 – cenomanské pískovce, 4 – svahová suť, 5 – pravděpodobný průběh pražského zlomu, a – odvodňovací vrty, b – těleso lanové dráhy. (Upraveno podle Záruby, Mencla, 1974).



Obr. 28: Profil sesuvem na svahu Petřína (Obr. 27). (Upraveno dle Záruby, Mencla, 1974).

### Bohdalec v Praze

Sesouvání po vrstevních plochách bývá způsobeno např. zásahem do přirozených poměrů svahu buď stavebními pracemi, nebo při těžení nerostných surovin (Obr. 29).



Obr. 29: Sesuv na svahu průkopu návrším Bohdalec v Praze. A- původní povrch území, b – upravený svah zářezu, c – sesuv královodvorských břidlic po vrstevných plochách. (Záruba, Mencl, 1974).

### Tunel Hřebeč, 2006

V ranních hodinách dne 1. 4. 2006 zavalil rozsáhlý sesuv svahových sedimentů východní portál tunelu Hřebeč (Obr. 30) včetně přilehlé části třípruhové komunikace I/35 na 5,320 až 5,370 km. Sesuv rovněž strhl 4 m vysokou gabionovou stěnu v horní části svahu (pod skalním výchozem) i část dřevěné palisády, která sloužila k zachytávání padajících skalních úlomků. Čelo sesuvu přemístilo prefabrikovaný sklad solanky na druhou stranu zavalené silnice. Zemní sesuv byl doprovázen zřícením části skalního výchozu na levé straně tunelového portálu. Objem sesutých hmot byl cca 10 000 m<sup>3</sup>.

Sesuv nastal po výrazném oteplení, kdy velké množství sněhu náhle roztálo a tání bylo doprovázeno dešťovými srážkami. Došlo k nasycení puklinových systémů v opukách a pískovcích a současně se zvodnily svahové sedimenty pod skalním výchozem. Vodní tlak na svahové uloženiny v horní části svahu kombinovaný se vztlakem na potenciální smykové ploše ve spodní části svahu vedl k rychlému sesuvnému pohybu. Přitom docházelo k uvolňování nestabilních bloků ze svislé skalní stěny. (Herle, 2007).

Území se nachází v oblasti potenciálních sesuvných deformací (mezi elevací Hřebečského hřbetu a depresí Boskovické příkopové propadliny). Toto území postihují dva typy přirozených svahových deformací. Jedná se o blokové sesuvy dle predisponovaných strukturních ploch zejména v prostředí vyšších svrchnokřídových celků odkrytých na okraji svahu (slínovce, pískovce) a o plošné sesuvy svahových sutí deponovaných na zvětralém skalním podloží.



Deformace svahu a nestabilní výrub byly častým jevem při ražení hřebečského tunelu v roce 1995.

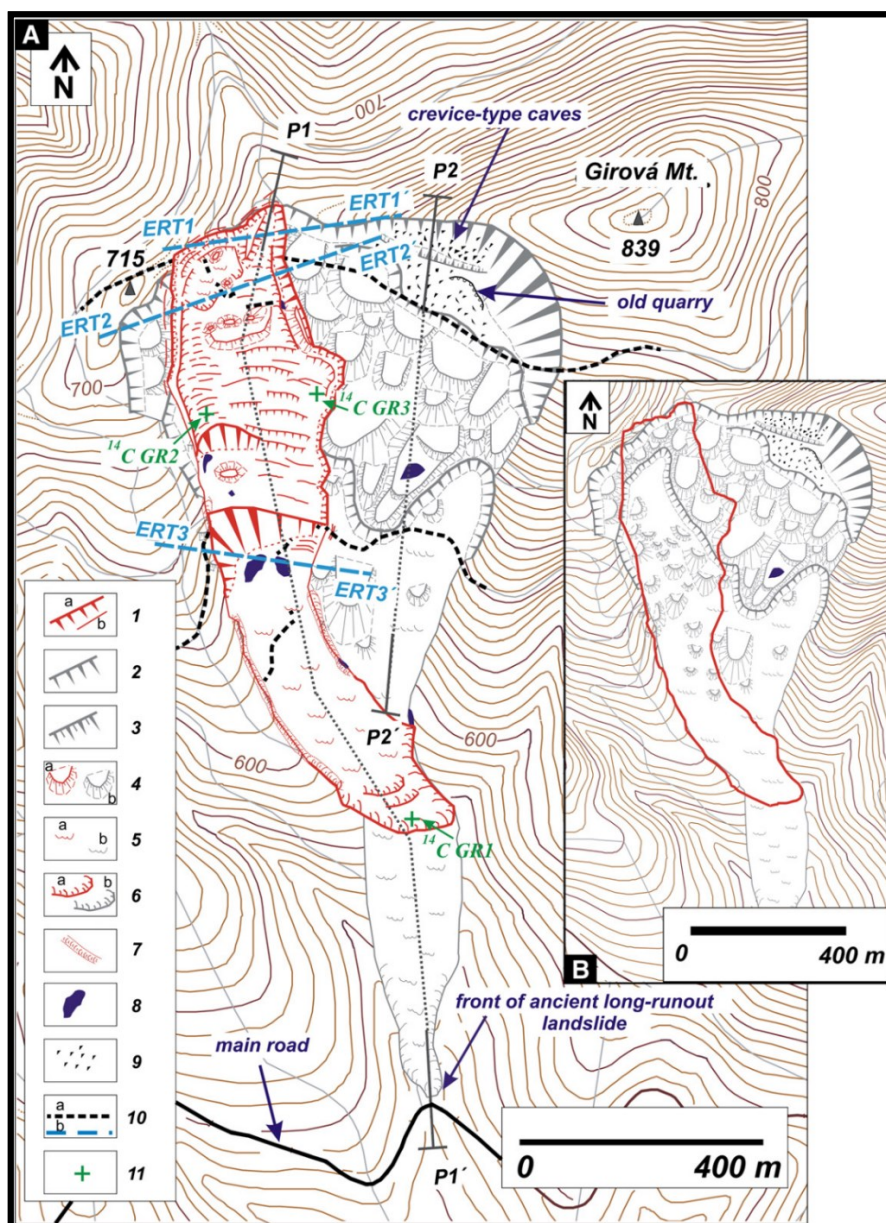
Jako sanační opatření byla navržena kombinace přítěžovací lavice v patě nestabilního svahu, drenážního žebra s geotextilií, izolačního přísypu výchozu měkkých glaukonitických pískovců a zasíťování svislého skalního výchozu včetně jeho ukotvení za hranou výchozu po odstranění většiny nestabilních bloků. Projektová dokumentace byla zpracována na základě výpočtů stability vyhodnocených specialisty. (Bohátková, 2007).



Obr. 30: Sesuv svahu u východního portálu tunelu Hřebeč, 2.4.2006. (Herle, 2007).

### **Gírová, 2010**

Gírová je nejvyšší hora české části Jablunkovského mezihoří, která má nadmořskou výšku 839 metrů. Leží v katastru obce Bukovec, několik málo kilometrů od polské a slovenské hranice. Dne 19. května 2010 došlo po vytrvalých deštích k reaktivaci svahu za vzniku rozsáhlého sesuvu hornin na jižním svahu Gírové (Obr. 31). Samotnému sesuvu předcházelo dlouhodobé boční rozvolňování svahu, který se ve vyšších partiích nad samotným sesuvem projevuje vznikem otevřených tahových trhlin, jeskynních systémů a pohybem skalních bloků. Svahové deformace jsou zde stále aktivní. (Pánek et al., 2010).

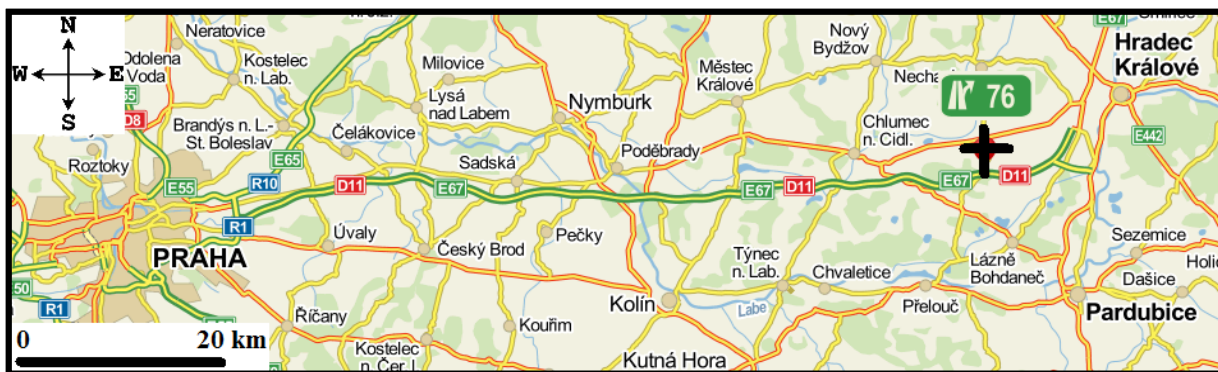


Obr. 31: Svahová deformace, hora Girová, Geomorfologická mapa. Situace měsíc po katastrofickém sesuvu (červen 2010). (Pánek et al., 2010 a [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)).



#### 4. PRAKTICKÁ ČÁST

Pro vlastní výzkum příčin svahové deformace jsem zvolila poškozený zářez dálnice D11, který se nachází v těsné blízkosti dálničního mostku 76 km východně od Prahy v Královéhradeckém kraji (dálniční exit 76, katastrální území obce Dobřenice, (Obr. 32). Svah byl v tomto místě postižen deformací dne 30.7.2012.



Obr. 32: Výřez z obecné mapy s vyznačením zájmové lokality 76 km východně od Prahy na dálnici D11 – exit 76. (<http://mapy.cz>).

Praktická část předkládané diplomové práce sestává ze tří částí:

- vlastní terénní průzkum (viz. kap. 4.2. *Terénní průzkum*);
- práce v laboratoři mechaniky zemin PřF UK (viz. kap. 4.3. *Laboratorní zkoušky*);
- práce se softwaru BricsCAD a GEO5 (viz. kap. 4.4. *Přehledná situace na lokalitě (práce v softwaru BricsCAD)*, 4.5. *Výpočet stability svahu zářezu dálnice D11* a 4.7. *Návrh sanace pro svahovou deformaci zářezu dálnice D11 (práce v softwaru GEO5)*).

##### 4.1. Regionálně geologické a hydrogeologické poměry zájmové lokality

Oblast, ve které se nachází zájmová lokalita poškozená svahovou deformací, spadá do soustavy Českého masivu s pokryvnými útvary a postvariskými magmatity. Dle inženýrsko - geologického členění spadá do regionu České křídové tabule, rajon kvartérních zemin – rajon spraší a sprašových hlín. Jedná se o pórovité a stlačitelné sedimenty lokálně prosedavé, středně únosné. (Matula et al., 1986).

## **Oblast České křídové tabule**

Česká křídová tabule zabírá rozsáhlou část severních a východních Čech a zasahuje až na severní Moravu. Sesuvy zde nejsou natolik časté, jako v oblasti karpatského flyše nebo Českého středohoří. Klasické rotační sesuvy se vyskytují ve zvětralých křídových jílovcích.

Kromě klasických sesuvů se zde vyskytují také blokové deformace, kdy bloky pískovců sjíždí do údolí po podložních jílovcích. (Matula et al., 1986).

## **Zájmová lokalita**

Území se nachází na rozhraní dvou oblastí - oblast spraší a sprašových hlín a oblast písků a štěrků (Obr. 33). V nadloží se jedná o říční terasy Labe kvartérního stáří. Na geologické stavbě se dále hlavní měrou podílejí svrchnokřídové nezpevněné sedimenty stáří cenoman až svrchní turon-koniak. Posledně jmenovaný útvar, zastoupený vápnitými jílovci a slínovci, zde tvoří základní výchozy. (ČGS – Geofond).

Postupnými erozivně-akumulačními cykly od miocénu do pleistocénu se zde vytvořil základní morfologický ráz krajiny. Činností toků se vytvořily erozivní rýhy, zaplňované fluviálními, případně eolickými sedimenty. Vlivem tektonických pohybů za významné spoluúčasti toků došlo postupně k tvorbě terasových stupňů, jejichž složení a charakter je podmíněn dalšími faktory. Jinak v sedimentaci převažuje štěrkopísková frakce.

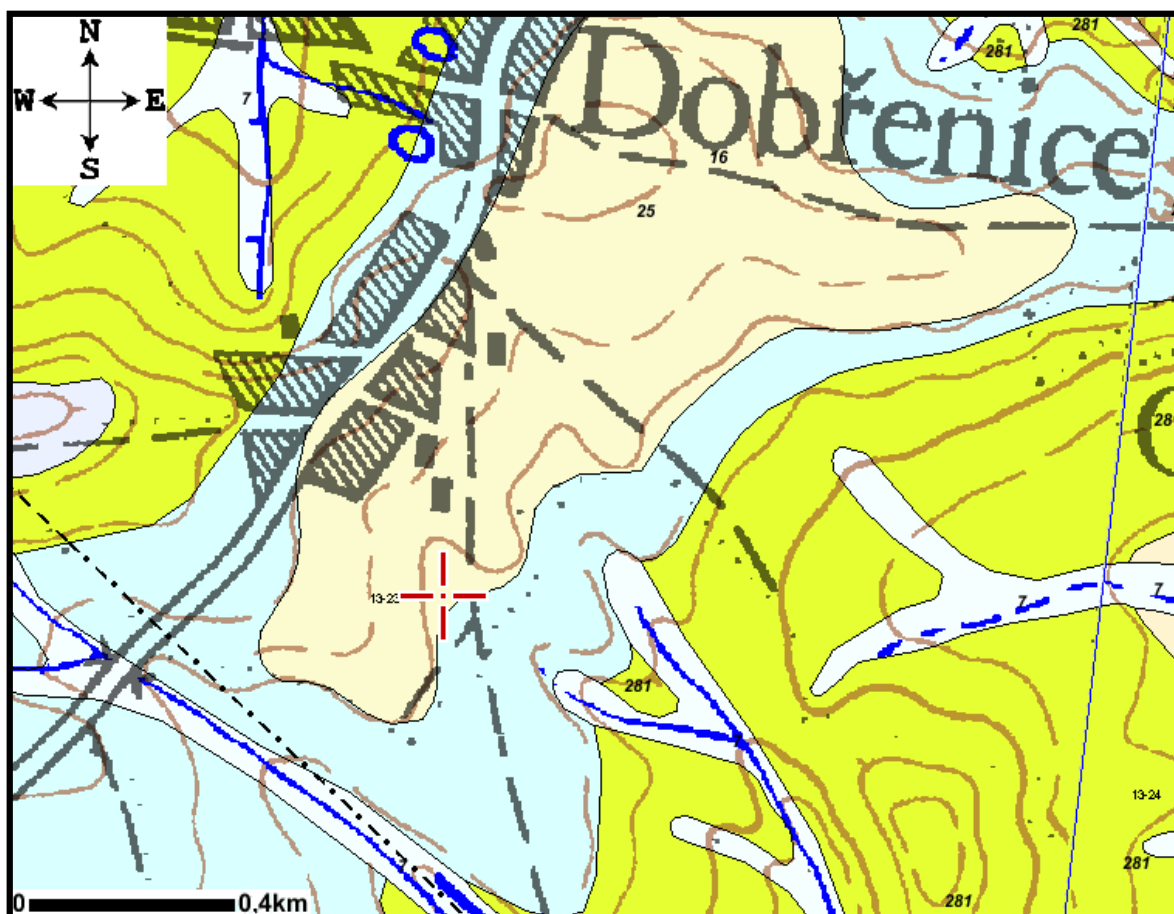
Vyšší (starší) terasové stupně mívají poměrně dobrou kvalitu vody, avšak vydatnosti jsou vázány na plošný rozsah a mocnost těchto stupňů, které nebývají velké. (ČGS – Geofond).

Z hlediska dělení teras patří zájmové území do svrchního stupně teras. Je zde zachován jednak zbytek terasy XI.stupně, stáří Gүнz (báze 67 m, povrch 82 m nad Labem), jednak IX.stupeň (báze 45 m, povrch 61 m).

Dle dělení regionů mělkých podzemních vod patří území do oblasti s celoročním doplňováním zásob. Dle klimatického dělení patří území do teplé oblasti s průměrnou teplotou 8°C a průměrným úhrnem srážek kolem 580 – 600 mm ročně. (ČGS – Geofond).

Ukázka vodohospodářské mapy daného území je na (Obr. 34).

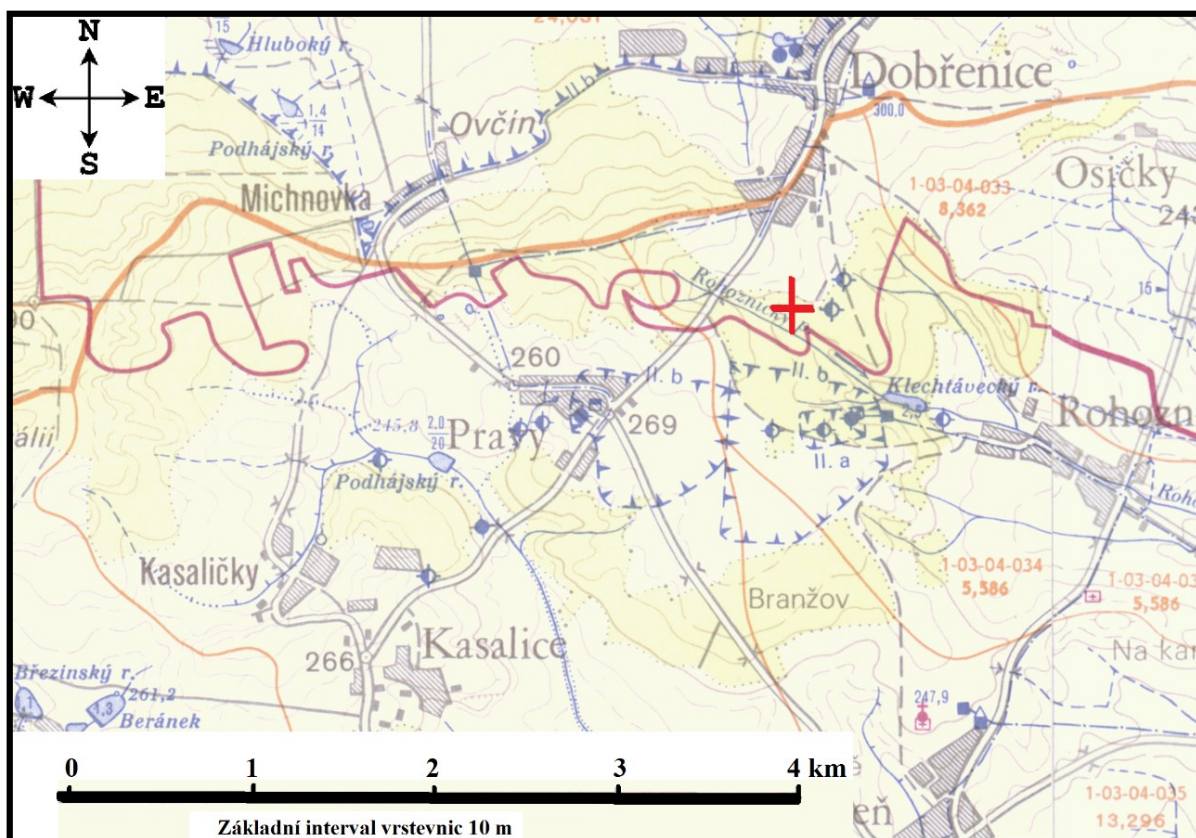




#### LEGENDA:

- kenozoikum - kvartér - pleistocén střední - mindel - písek, štěrk - sediment nezpevněný
- kenozoikum - kvartér - pleistocén svrchní - spraš, sprašová hlina - sediment nezpevněný
- mezozoikum - křída svrchní - coniac, santon - březenské souvrství - vápnitý jílovec, slínovec, vápnitý prachovec - sediment zpevněný - česká křídová pánev - ohárecký, lužický, labský vývoj
- zlom předpokládaný
- mylonitizovaná zóna
- komunikace
- komunikace
- zájmové území - zářez dálnice D11 na 76. km od Prahy

Obr. 33: Geologická mapa s lokalizací zájmového území a legendou. (<http://mapy.geology.cz>).



Obr. 34: Výřez z vodohospodářské mapy. (<http://heis.vuv.cz/>).

#### 4.2. Terénní průzkum

Práce v terénu zahrnovala:

- odběr vzorků L 21 – L 28 (viz. kap. 4.2.1. *Odběr vzorků*);
- stanovení rozměrů svahové deformace (viz. kap. 4.2.2. *Stanovení rozměrů svahové deformace*);
- geofyzikální měření (viz. kap. 4.2.3. *Geofyzikální měření*).

Situace na lokalitě v den aktivace svahové deformace je zdokumentována na obrázku (Obr. 35). Situace měsíc poté je znázorněna na obrázku (Obr. 36).





Obr. 35: Svahová deformace. Zářez dálnice D11 na 76. km od Prahy v den aktivace svahové deformace. 30.7.2012. (Zbyněk Suchánek, ŘSD).



Obr. 36: Svahová deformace a erozí vyhloubený zářez dálnice D11 na 76. km od Prahy. 27.8.2012. (Foto: autor).



#### 4.2.1. Odběr vzorků

Odkryvné práce byly zjednodušené vlivem postupující eroze dálničním zářezem. Na lokalitě jsem s vedoucím práce odebrala z každé vrstvy deformované části zářezu (Obr. 37) vzorky zeminy (L 21 – L 28). Odebrala jsem porušené i neporušené vzorky. Porušené vzorky byly odebrány pomocí lopaty do pevných pytlů, neporušené vzorky (odebrán jen vzorek L 26) pomocí odběrných kroužků (Obr. 38) o velikosti 12 x 15,5 cm (ručně kopaná sonda). Udělala jsem jejich terénní předběžný popis dle velikosti zrn, barvy, vlhkosti a soudržnosti.

Na těchto vzorcích jsem v laboratoři mechaniky zemin provedla soubor průkazných a kontrolních zkoušek (viz. kap. 4.3. *Laboratorní zkoušky*).



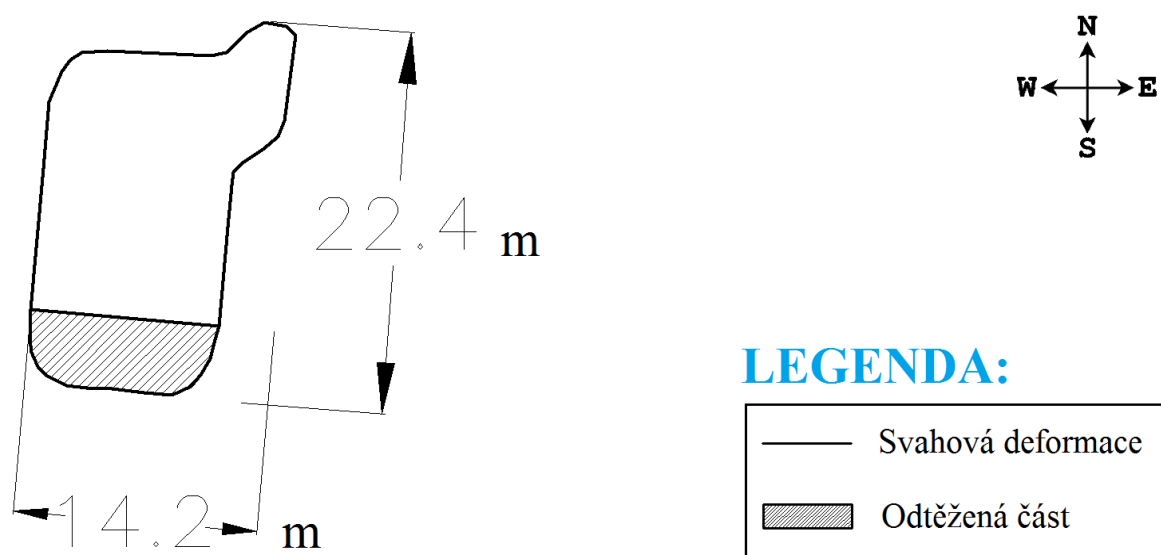
Obr. 37: Profil svahovou deformací v místě erozního zářezu dálnice D11 na 76. km od Prahy. 27.8.2012. (Foto: autor).



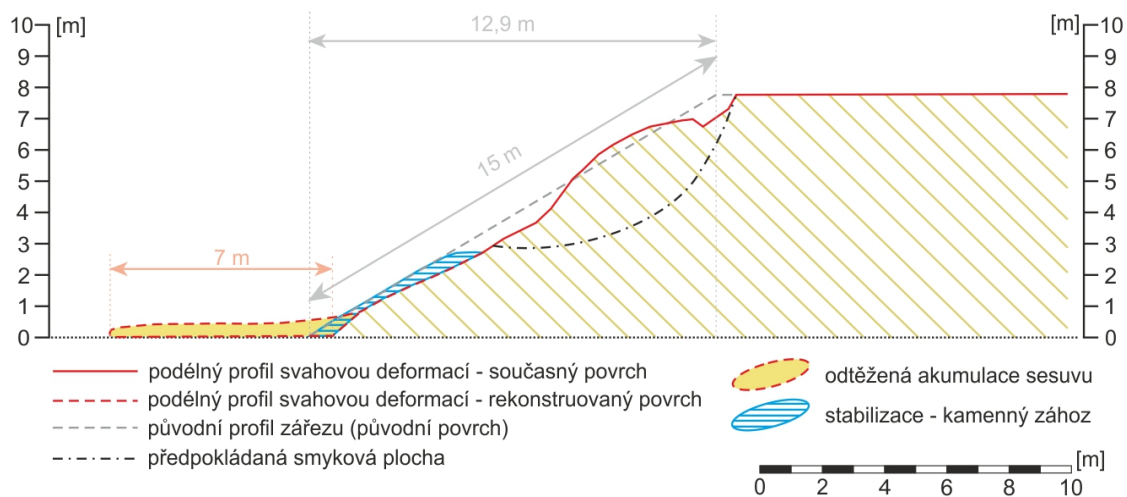
Obr. 38: Odběrný kroužek (12 x 15,5 cm), ručně kopaná sonda. (Foto: autor).

#### *4.2.2. Stanovení rozměrů svahové deformace*

Rozměry deformace jsem v terénu stanovila pomocí dálkoměru (TruPulse 360B). Délka a šířka deformace je zobrazena na obrázku (Obr. 39). Obrázek jsem vykreslila v softwaru BricsCAD, postup (viz. kap. 4.4. *Přehledná situace na lokalitě (práce v softwaru BricsCAD)*). Hloubka smykové plochy byla změřena až 3 m a je znázorněna na obrázku podélného profilu svahovou deformací (Obr. 40). Tento obrázek je vykreslen v programu CorelDRAW. Sklon svahu dálničního zářezu jsem vypočítala pomocí goniometrických funkcí  $\alpha=31^{\circ}$  (1 : 1,6).



Obr. 39: Rozměry svahové deformace. BricsCAD.



Obr. 40: Podélný profil svahovou deformací. CorelDRAW.

Přehledná situace na lokalitě je vykreslena na obrázku (viz. kap. 4.4. *Přehledná situace na lokalitě (práce v softwaru BricsCAD)*, Obr. 52) a také je ve zvětšeném měřítku k nahlédnutí v přílohách (viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 1).

#### 4.2.3. Geofyzikální měření

Pro předběžné zjištění geologie svahu jsme zvolili geofyzikální metodu - Elektrickou odporovou tomografii (ERT), (Obr. 41).

**Elektrická odporová tomografie** (electrical resistivity tomography, ERT) patří mezi stejnosměrné geoelektrické metody. Využívá většinou symetrického 4-elektrodového uspořádání, kdy jedním párem uzemněných elektrod (A, B) injektujeme do podloží stejnosměrný proud  $I$  a na druhém páru elektrod (M, N) potom měříme elektrické potenciály, tedy napětí  $U$ . Z modifikované rovnice Ohmova zákona

$$\rho_a = k \frac{U}{I}$$

$$\dots \rho_a [\Omega\text{m}], U [\text{mV}], I [\text{mA}], k [\text{m}]$$

lze potom vypočítat tzv. zdánlivý měrný odpor  $\rho_a$ . Konstanta  $k$  se potom nazývá *konstantou uspořádání* (geometric factor) a závisí na zvolené konfiguraci (uspořádání, geometrii) elektrod (Loke 1996, Karous, 1989). Rezistivní model byl zpracován procesem tomografické inverze v programu Res2Dinv (Loke, Geotomo Software) a výsledný odporový řez potom představuje již „skutečný“ (ve skutečnosti modelovaný) měrný odpor  $\rho$ , tedy nikoli zdánlivý měrný odpor.

Pro účely geofyzikálního průzkumu bylo zvoleno uspořádání typu Wenner-Schlumberger, a to z důvodu dobrého rozlišení, dostatečného hloubkového dosahu a citlivosti jak na detekci horizontálních, tak i vertikálních struktur (Loke, 1996). Celková délka profilu byla 63 m a byl zvolen rozestup elektrod 1 m. Použito bylo 64 elektrod a tedy 961 měřených bodů v 21 hloubkových úrovních. Jednalo se tedy o poměrně podrobné měření.

Pro samotné měření byla použita moderní aparatura ARES (Automatic resistivity system) brněnské firmy GF Instruments. Export dat byl proveden pomocí programu ARES dodávaného výrobcem a výsledná inverzní model zpracován v programu Res2Dinv.

Interpretace výsledků, tedy odporového modelu (řezu), byla provedena společně s interpretací dokumentovaných vrtů (viz. kap. 4.5.1. *Práce v softwaru BricsCAD*, Obr. 54 a také ve zvětšeném měřítku viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 3).





Obr. 41: Elektrická odporová tomografie (ERT), zářez dálnice D11 na 76. km, 2.4.2014. (Foto: Petr Tábořík).

#### 4.3. Laboratorní zkoušky

Veškeré své laboratorní zkoušky jsem uskutečnila v laboratoři mechaniky zemin na PřF UK. Pro zjištění vlastností odebraných vzorků zemin z porušeného zářezu dálnice D11 jsem zvolila tyto metody:

- na vzorcích L 21 – L 28 jsem stanovila **zrnitostní složení** pomocí síťování a hustoměrné zkoušky (viz. kap. 4.3.1. *Zrnitostní zkouška*);
- na vzorku L 26 jsem stanovila **plasticitu** (viz. kap. 4.3.2. *Plasticita*);
- na rekonstituovaných vzorcích L 26 a L 27 jsem stanovila **kritickou pevnost** v translačním smykovém přístroji (viz kap. 4.3.3. *Zkouška v translačním smykovém přístroji*).



#### 4.3.1. Zrnitostní zkouška

*Zrnitost (granulometrické složení zeminy)*: je jedna z nejdůležitější fyzikálních vlastností zeminy. Zrnitost poskytuje popis zeminy založený na hmotnostním podílu jednotlivých zrnatostních frakcí přítomných v dané zemině. Pro klasifikace zemin (pojmenování a zatřídění zeminy i odhad jejich vlastností) je třeba znát její zrnatostní složení. K zrnatosti zemin se vztahuje řada geotechnických a hydrologických vlastností zeminy. (Upraveno podle norem ČSN EN ISO 14688-1 a ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).

Zkouška zrnatostního složení zemin se řídí podle normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4. Tato technická specifikace popisuje zkušební metodu pro stanovení zrnatosti neztvrdnutých vzorků zeminy.

Zastoupení každé frakce v zemině o velikosti 0,001 až 63 mm se provádí pomocí následujících mechanických rozborů:

- **prosévání** (sítový rozbor) – oddělení hrubší frakce prosetím vzorku standardizovanou sadou sít tak, jak uvádí norma ČSN ISO 3310-1;
- **sedimentace** (hustoměrná zkouška) – stanovení jemnější frakce.

Pro smíšené zeminy musí být zvolena zkušební metoda provedená odděleně proséváním a sedimentací. Jestliže 90 % nebo více zrn zeminy jsou většího průměru než 0,063 mm, pak musí být provedeno prosévání. Jestliže více než 10 % zrn zeminy jsou menšího průměru než 0,063 mm, pak musí být pro rozbor zrnatosti proveden kombinací prosévání a sedimentací. (Upraveno podle normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).

Z výsledků získaných prosévací i hustoměrnou zkouškou znázorníme granulometrické složení zeminy graficky - vykreslením *křivky zrnatosti* zemin.

**Křivka zrnatosti**: je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna  $d$  v milimetrech. Tento způsob má tu výhodu, že můžeme z diagramu hned vyčíst rozdělení zrn do jednotlivých rozmezí. Nevýhodou je, že tvar křivek nám neudává přímo druh zeminy. Z křivky zrnatosti můžeme zjistit: složení zeminy, pojmenování zeminy, stejnozrnnost a křivost dle tvaru křivky zrnatosti, atd. (Šimek, 1964).

##### 4.3.1.1. Sítový rozbor

*Sítový rozbor (prosévací zkouška)* – prosévání je proces, při němž je nesoudržná zemina rozdělena do zrnatostních skupin sadou kontrolních (normovaných) sít. Z prosévání vzorku sadou sít zjistíme nadsítnou hmotnost pro jednotlivá síta a hmotnost propadu sítem s nejmenšími otvory. Touto metodou můžeme analyzovat zeminy se zrny o velikosti 0,063 až

63 mm. Je-li podíl propadu skrz nejmenší síto (0,063mm) větší než 10% je nutné provést hustoměrnou zkoušku. (Upraveno podle normy ČSN ISO 3310-1).

Sítový rozbor byl proveden na vzorcích L 21 - L 25, L 27 a L 28.

Vzorek zeminy jsem navážila a nechala vysušit 24 hodin v horkovzdušné peci při teplotě 110 °C. Vysušený vzorek jsem opět zvážila, a protože byl trochu spečený, musela jsem ho rozdružit v třecí misce, abych od sebe oddělila jednotlivá zrna. Takto připravenou navážku jsem vysypala na sadu sít navrchu s nejhrubšími otvory až po nejjemnější. Nejhrubší síto jsem použila s otvory velikosti 2 mm a nejjemnější síto s otvory velikosti 0,125 mm. Prosévala jsem vodorovnými pohyby celou sadou sít, tak aby částice zeminy byly stále v pohybu. Prosévání jsem dokončila s každým sítem zvlášť s podloženým dnem. Podsítné jsem vždy přidala k dalšímu jemnějšímu sítu. Částice zachycené v sítích jsem šetrně odstranila štětcem a začlenila do nadsítného. Zbytky frakcí na jednotlivých sítích jsem zvážila, hmotnosti jsem zaznamenala do tabulek (Tab. 5 – Tab. 11) a vypočítala jsem procento zrn na jednotlivých sítích. (Upraveno podle skript Šimka (1964) a normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).

#### 4.3.1.2. Hustoměrná (aerometrická) zkouška

*Hustoměrnou zkouškou se analyzuje zrnitost zemin, jejíž zrna jsou velikosti 0,001 až 0,063 mm a jejich hmotnostní podíl je větší než 10 %. Metoda se řadí do skupiny sedimentačních metod s nepřerušovanou sedimentací suspenze, to znamená, že všechna měření se provádějí během jednoho sedimentačního procesu. Tato metoda spočívá na volné sedimentaci zrn suspenze v kalibrovaném sedimentačním (odměrném) válci (1000 ml). Částice s různou velikostí sedimentují rozdílnými rychlostmi podle Stokesova vzorce. Suspenze se podle velikostí zrn oddělí do zrnitostních skupin a ve válci se tak snižuje hustota suspenze, kterou měříme speciálním hustoměrem. Metoda je tedy založena na měření hustoty v čase. A pomocí Cassagrandeho nomogramu určíme odpovídající průměr zrn. (Upraveno podle skript Šimka (1964) a normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).*

Hustoměrná zkouška byla provedena na vzorcích L 23, L 24, L 26 a L 27.

Vzorek s velikostí frakce menší než 0,125 mm jsem vložila do porcelánové misky, zalila destilovanou vodou a přidala dispergační činidlo - vodní sklo (hexametafosforečnan sodný), aby se zabránilo vložkování (sražení). Obsah jsem zamíchala a nechala 24 hodin dispergovat (rozpouštět). Poté jsem suspenzi důkladně rozdružila mixérem a vlila do odměrného válce, který jsem položila na vodorovnou podložku, doplnila obsah přesně na 1000 ml destilovanou vodou, důkladně promíchala, do suspenze opatrně zasunula hustoměr a ihned jsem zahájila měření pomocí stopek. Hustotu jsem měřila v časech 1,5 min., 5 min., 15 min., 1 hod., 2 hod., 4 hod. a 24 hod. Hustota se odečítá na horním menisku. Po každém čtení jsem hustoměr vytáhla, aby nedocházelo k jeho zatěžování usazujícími se částicemi, opláchla destilovanou vodou ze stříčky a položila na filtrační papír. Při každém dalším měření jsem hustoměr znovu ponořila (s patřičným předstihem) a poté opět vyjmula. Současně jsem v mezičasech měřila teplotu suspenze teploměrem a kontrolovala, zda nedošlo k vložkování. (Upraveno podle skript Šimka (1964) a normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).

Naměřené hodnoty ze všech usazovacích zkoušek jsem zaznamenala do tabulek (Tab. 12 – Tab. 15) a vyhodnotila měření pomocí Cassagrandeho nomogramů, které k daným hustoměrům patří podle jejich čísla. (Upraveno podle skript Šimka (1964) a normy ČSN CEN ISO/TS 17 892-4).

#### 4.3.1.3. Tvar křivky zrnitosti

Ve spojitosti se stanovením hrubé frakce zeminy může být upřesněn charakter zrnění na zeminu „dobře zrněnou“ a „špatně zrněnou“. V této souvislosti se používají pro popsání tvaru křivky zrnitosti kvantitativní ukazatele **součinitel křivosti (Cc)** a **číslo nestejnozrnnosti (Cu)**. (ČSN EN ISO 14 688–2).

**Součinitel křivosti Cc** (coefficient of curvature): je součinitel pro posouzení tvaru křivky zrnitosti v oblasti od  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  po  $d_{60}$ . (ČSN EN ISO 14 688–2).

$$Cc = (d_{30})^2 / (d_{10} * d_{60})$$

**Číslo nestejnozrnnosti Cu** (uniformity coefficient): je součinitel pro posouzení tvaru křivky zrnitosti – charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti - v oblasti od  $d_{10}$  do  $d_{60}$ .  $d_{10}$  a  $d_{60}$  jsou velikosti zrn příslušející pořadnicím u 10% a 60% propadu z celkové navážky. (ČSN EN ISO 14 688–2).

$$Cu = d_{60} / d_{10}$$

Pro posouzení tvaru křivky zrnitosti jsem pro hrubozrné vzorky L 21 – L 25, L 27 a L 28 zvolila výpočet dle součinitele křivosti Cc. (ČSN EN ISO 14 688–2).

#### 4.3.2. Plasticita

Jemná frakce zeminy (0,001 - 0,063 mm) reprezentovaná jílem, siltem a jílovými minerály, která se může vyskytovat samostatně nebo ve směsi s hrubším materiálem, se obvykle

klasifikuje podle plasticity. Plasticita se zjišťuje u zemin se zastoupením jemnozrnné zeminy větším jak 15%. Tyto zeminy jsou popisovány jako soudržné, mají plastické vlastnosti. (Murthy, 2003).

Přesné určení plasticity a určení zeminy buď jako prach nebo jíl může být provedeno pouze na základě stanovení meze tekutosti  $w_L$  a meze plasticity  $w_P$  laboratorní zkouškou podle jejich empiricky stanovených vlhkostí. Kapalná fáze má totiž vliv na vlastnosti soudržných zemin. Tyto **konzistenční (Atterbergovy) meze** jsou mezi jednotlivými konzistenčními stavy (Obr. 42). (Murthy, 2003).

Plasticitu jsem stanovila pouze u jemnozrnného vzorku L 26.

Norma ČSN CEN ISO/TS 17892-12 dělí *konzistenční meze* na:

- mez tekutosti (viz. kap. 4.3.2.1. *Mez tekutosti ( $w_L$ )*);
- mez plasticity (viz. kap. 4.3.2.2. *Mez plasticity ( $w_P$ )*);
- mez smrštění.

**Mez smrštění  $w_s$ :** je empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází mezi stavem pevným a stavem tvrdým.

**Stupeň konzistence  $I_c$**  (consistence index), (ČSN CEN ISO/TS 17892-12):

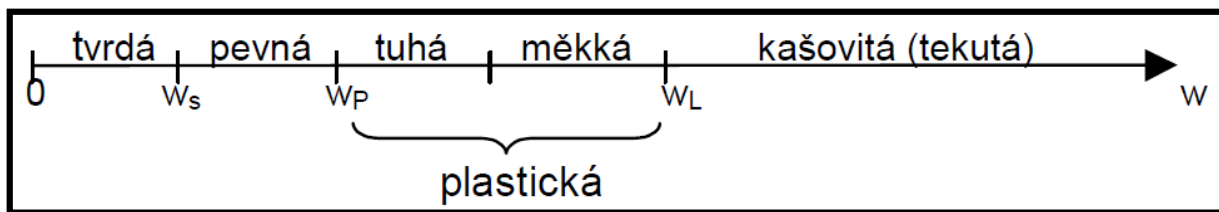
$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_p}$$

#### VYSVĚTLIVKY:

$w$ ...původní vlhkost zeminy  
 $w = m_w / m_s$   
 $m_w$ ...hmotnost vody  
 $m_s$ ...hmotnost pevných částic

**Konzistence** soudržných zemin (hlína a jíl) se stanoví manuální zkouškou, která umožní její následující pojmenování a popis (ČSN EN ISO 14 688–2):

- velmi pevné ( $I_c > 1,00$ );
- pevné ( $I_c = 0,75 - 1,00$ );
- tuhé ( $I_c = 0,50 - 0,75$ );
- měkké ( $I_c = 0,25 - 0,50$ );
- velmi měkké ( $I_c < 0,25$ ).



Obr. 42: Konzistenční stavy a konzistenční (Atterbergovy) meze. ( $w$ =původní vlhkost zeminy).

Konzistenční meze jsou ovlivněny oxidací a jinými změnami zkušebního vzorku v důsledku např. dlouhodobého skladování nebo nevhodné manipulace se vzorkem. To se týká zejména citlivých jíílů, jíílů s obsahem sulfidů a organických zemin. (Murthy, 2003).

**Stupeň (číslo, index) plasticity  $I_p$**  (plasticity index) jemnozrnných zemin: je početní rozdíl meze tekutosti a meze plasticity zemin. (ČSN CEN ISO/TS 17 892-12).

$$I_p = w_L - w_P$$

Stupeň plasticity jemnozrnných zemin má být dle ČSN EN ISO 14688-2 pojmenován takto:

- neplastické;
- nízká plasticita;
- střední plasticita;
- vysoká plasticita.

#### 4.3.2.1. Mez tekutosti ( $w_L$ )

**Mez tekutosti  $w_L$**  (liquid limit): je empiricky stanovená vlhkost, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického. Laboratorní stanovení meze tekutosti děláme pomocí *kuželové zkoušky*. Zkušební vzorek může být získán z přirozené zeminy nebo ze zeminy, u které byl odstraněn materiál zachycený při prosévání na síť o průměru oka 0,4 mm (nebo jemu nejbližším). Kužele přijaté normou ČSN CEN ISO/TS 17892-12 jsou tvaru 60 g/60° a 80 g/30°. (ČSN CEN ISO/TS 17892-12).

Alternativní metodou pro stanovení meze tekutosti je Casagrandeho metoda, jejíž výsledky jsou však ve velké míře subjektivně ovlivněny osobním přístupem laboranta při provádění a

vyhodnocování zkoušek. Je proto upřednostňována kuželová zkouška. (ČSN CEN ISO/TS 17892-12).

Laboratorní zkoušku pro stanovení meze tekutosti na vzorku L 26 jsem provedla dle norem ČSN CEN ISO/TS 17892-6 a ČSN CEN ISO/TS 17892 – 12. Použitými laboratorními pomůckami bylo síto s otvory velikosti 0,5 mm, laboratorní váhy, misky pro přípravu vzorků odlišné vlhkosti, kovová miska pro zkoušení vzorku a kuželový přístroj s kuželíkem 80 g/30°.

Navázila jsem 300 g zeminy přesypané přes síto 0,5 mm. Z takto proseté zeminy jsem připravila pastu, kterou jsem důkladně promíchala. Podle potřeby jsem do pasty přidala množství destilované vody tak, aby se vlhkost pohybovala mezi předpokládanou mezí tekutosti.

Vzorek jsem zkoušela v kuželovém stroji, kde jsem zaznamenávala penetraci kuželíku prostupujícího do zeminy po době 5 s. Vlhkost na mezi tekutosti je při použití kuželíku 80 g/30° při penetraci 20 mm.

#### 4.3.2.2. Mez plasticity ( $w_p$ )

**Mez plasticity  $w_p$**  (plastic limit): je empiricky stanovená nejnižší vlhkost zeminy, při které je zemina natolik vysušená, že ztrácí svoji plasticitu. Zemina přechází mezi stavem plastickým a stavem pevným. Stanovení meze plasticity se obvykle provádí souběžně se stanovením meze tekutosti. Výsledky zkoušek jsou však ovlivněny osobním přístupem laboranta. (ČSN CEN ISO/TS 17892-12).

Laboratorní zkoušku pro stanovení meze plasticity na vzorku L 26 jsem provedla opět dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12. Použitými laboratorními pomůckami bylo síto s otvory velikosti 0,5 mm, laboratorní váhy, skleněná podložka, stěrka, šablona o průměru 3 mm a délky 100 mm, keramické váženky a horkovzdušná pec.

Opět jsem navázila 300 g zeminy přesypané přes síto 0,5 mm. Z takto proseté zeminy jsem připravila pastu, kterou jsem důkladně promíchala. Podle potřeby jsem do pasty přidala množství destilované vody tak, aby se vlhkost pohybovala mezi předpokládanou mezí plasticity. Z takto upravené zeminy jsem odebrala vzorek o hmotnosti 20 g a vytvarovala jsem ho do tvaru kuličky. Vzorek jsem rozdělila na dvě části a válela po skleněné podložce, dokud se válečky neblížily průměru 3 mm. V okamžiku, kdy se na válečku o průměru 3 mm začaly objevovat příčné nebo podélné trhliny, jsem zkoušku ukončila a zeminu jsem vložila do váženek pro zjištění vlhkosti.

#### 4.3.3. Zkouška v translačním smykovém přístroji

Pro stanovení kritické pevnosti ( $c$  – soudržnost,  $\varphi'$  – úhel vnitřního tření) svých vzorků zeminy jsem použila translační smykový přístroj (Obr. 43). Pevnost zeminy je nutné znát ke statickému řešení úloh z mechaniky zemin pro výpočet únosnosti zemin, stability svahů,

výpočet zemních tlaků atd. Při namáhání zeminy dojde nejčastěji k porušení smykem. *Smyková pevnost zeminy*  $\tau$  = smykové napětí, při němž se vzorek zeminy usmykne při stálém normálovém napětí  $\sigma$ .

Ve své laboratorní práci jsem postupovala dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a dle návodu ShearPLEX user manual (2004). Zkoušky v tomto přístroji jsem provedla na dvou vybraných reprezentativních vzorcích jílu (L 26) a písku (L 27). Porušený vzorek písku byl odebrán z hloubky 1 m a neporušený i porušený vzorek jílu 1,8 m pod terénem svahu. Vzorky byly připraveny jako rekonstituované pasty.



Obr. 43: Translační smykový přístroj, laboratoř mechaniky zemin PřF UK. (Foto: autor).

- **Příprava rekonstituovaného materiálu**

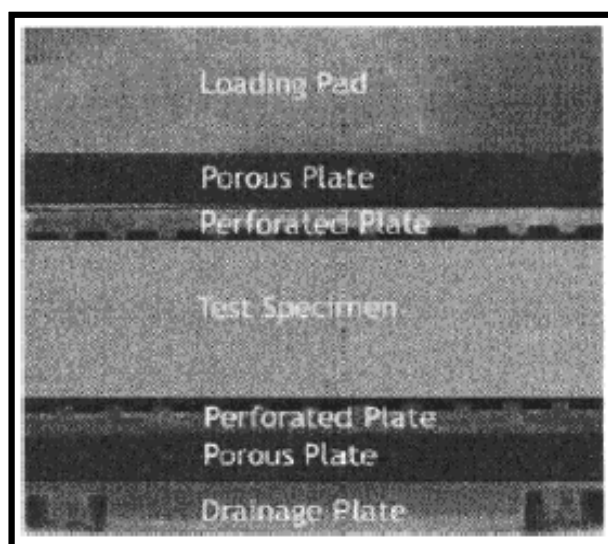
Vzorek jílu jsem nejdříve nastrouhala, vzorek písku jsem rozdružila a poté jsem vzorky rozmíchala s pitnou vodou. Vzorky s vodou jsem smíchala v hnětacím přístroji do vzniku homogenní pasty. Vodu jsem během mixování musela dolévat. Doba míchání vzorků trvala cca 3 – 5 hodin. Vlhkost pasty byla vyšší než vlhkost na mezi tekutosti (tzv. rekonstituované vzorky). Rekonstituované materiály jsou výhodné tím, že při práci s nimi (např. vyplňování prostoru rekonstituovaným vzorkem při triaxiálních a krabicových zkouškách) nedochází ke vzniku nevyplněných míst. (Hájek et al., 2006).

Součástí translačního smykového přístroje je odnímatelná vzorková krabice. Krabice je složena ze dvou částí, které mají hlavní rozdíl ve tvaru prostoru pro ukládání vzorku. Tento prostor pro

vzorek je kruhového průřezu o průměru 6 cm a výšky 5 cm. Odvodnění vzorku je zajištěno pomocí dvou porézních destiček, které se osazují do vzorkové krabice při instalaci vzorku. Smyková krabice je před zkouškou uložena do kovové otevřené nádoby obdélníkového tvaru, ke které je pomocí dvou šroubů upevněna. (ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a ShearPLEX user manual, 2004).

Axiální normálové napětí je na zkoušený vzorek vyvozeno pákovým systémem, který pracuje v poměru 1:10. Vzhledem k ploše vzorku odpovídá tedy 1 kg na pákovém systému napětí zhruba 35 kPa. Dynamometr v horní části přístroje je při smyku pevně přichycen k smykové, vzorkové, krabici a je tahově namáhán. Vlastní rychlost smykání zajišťuje elektrický motor umístěný v těle smykového přístroje. (ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a ShearPLEX user manual, 2004).

Obrázek (Obr. 44) znázorňuje schéma uspořádání vzorku, podstav a porézních destiček ve vzorkové krabici.



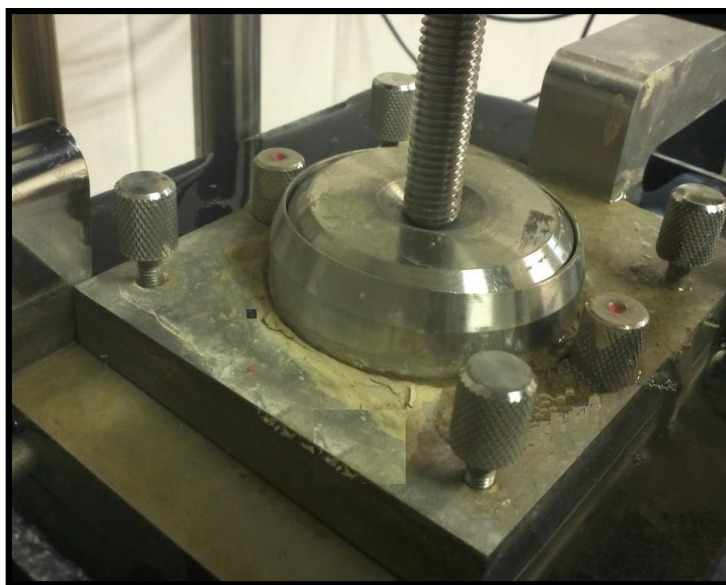
Obr. 44: Uspořádání vzorku v translačním smykovém přístroji (6 x 5 cm). (ShearPLEX user manual, 2004).



## Metodika zkoušky

Pro každou zkoušku jsem ze svých vzorků připravila vždy rekonstituovanou pastu. Porézní destičky jsem na čtvrt hodiny ponořila do vody do ultrazvukové lázně. Tato metoda zajistí jejich pročištění. Porézní destičky zde slouží ke zkoušení vzorků při drénované události.

Podle návodu jsem osadila vzorek do smykového krabicového přístroje mezi porézní destičky, přičemž vzájemná poloha nepohyblivé a pohyblivé části krabice se zajistí odnímatelnými kovovými fixačními šrouby procházející oběma částmi krabice. Jelikož je materiál rekonstituovaný, po osazení, zatížení a následné konsolidaci dojde k vytlačování materiálu a tedy k velkému snížení výšky vzorku. Abych zajistila potřebnou výšku vzorku po jeho konsolidaci, nanasla jsem pastu až po okraj prostoru pro vzorek. Aby nedošlo k vychýlení, či zaražení horní perforované destičky o okraj horní části vzorkové krabice, umístila jsem zde prstenec (Obr. 45), který slouží k vyřezávání vzorků z neporušené zeminy. Vzorkovou krabici jsem zalila vodou, aby nevysychal. Během zkoušky jsem vodu musela dolévat. Nastavila jsem hodinky na přístroji, zvolila jsem interval zapisování pro jíl 600s a pro písek 10s a nastavila jsem rychlost posunu smykové krabice pro jíl 0,0002 mm/min a pro písek 0,1 mm/min. (ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a ShearPLEX user manual, 2004).



Obr. 45: Prstenec, translační smykový přístroj, laboratoř mechaniky zemin, PřF UK. (Foto: autor).

Po osazení pasty a nastavení přístroje, následovala fáze konsolidace. Zkoušky se provádějí pro 3 až 4 různá konsolidační napětí  $\sigma$ , na svých vzorcích jsem provedla vždy 3 zkoušky. Vzorek jsem začala zatěžovat normálovým napětím až na požadované zatížení. Hodnotu zatížení jsem zvolila dle plochy vzorku takto: 3 kg zatížení = napětí 105 kPa, 6 kg zatížení = 210 kPa a pro 9 kg závaží je to 315 kPa. Vzorek jílu se musí zatěžovat pomaleji lehčími závažími nejlépe o hmotnosti 100 g, postupně jsem rozdíl hmotnosti závaží mohla zvětšovat. Vzorek písku drénuje a konsoliduje rychleji, tedy jsem mohla přidávat závaží o dost rychleji a větších hmotností. Po zatížení vzorku posledním závažím jsem vyčkala na konsolidaci zeminy (délka konsolidace závisí na typu zeminy). Po ukončení konsolidace jsem odebrala fixační šrouby spojující obě části smykové krabice. Dále jsem nastavila výšku smykové plochy a to pomocí

čtyř šroubů umístěných vedle fixačních šroubů. Výšku smykové plochy jsem zvolila dle návodu ShearPLEX user manual (2004) na 0,4 mm, což odpovídá polovině otočky všech čtyř šroubů. (ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a ShearPLEX user manual, 2004).

Po veškerém nastavení jsem spustila měření. Každá zkouška se provádí až do usmyknutí vzorku, což se projevuje tím, že při zvětšujícím se posunu se smykové napětí již dále nezvyšuje, popř. klesá.

Sedání vzorku při konsolidaci, posun smykové krabice a deformace ocelového dynamometru (třmenu) zaznamenávaly digitální úchylkoměry.

#### 4.3.4. Výsledky laboratorních zkoušek

##### 4.3.4.1. Vyhodnocení zatřídování zemin

Zatřídování zemin do příslušných skupin probíhalo pouze na základě složení zeminy. Na zatřídování totiž nemá vliv vlhkost ani ulehlost. (ČSN EN ISO 14 688–2).

Pro zatřídění vzorků zemin jsem stanovila jejich *zrnitost* (u všech vzorků), *charakter zrnění* (u hrubozrnných vzorků L 21 – L 25, L 27 a L 28) a *plasticitu* (u jemnozrnného vzorku L 26).

Veškeré mé laboratorní kroky a zatřídování zeminy postupovaly podle skript Šimka (1964), dle práce Murthyho (2003) a podle norem ČSN 73 6133, ČSN EN ISO 14 688–1, ČSN EN ISO 14 688–2, ČSN CEN ISO/TS 17 892–4 a ČSN ISO 3310-1.

Výsledky síťových rozborů vzorků L 21 – L 25, L 27 a L 28 jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 5 – Tab. 11). Při tomto měření došlo k nepatrným nepřesnostem v konečném součtu naměřených hmotností zeminy na jednotlivých sítích po ručním prosévání vůči nasypané hmotnosti vzorku na sadu sít. Důvodem hmotnostních ztrát byla nejspíše zachycená zrna v otvorech sít.

Výsledky z hustoměrných zkoušek vzorků L 23, L 24, L 26 a L 27 jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 12 – Tab. 15).

Křivky zrnitosti vzorků L 21 – L 28 jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 46 - Obr. 48). Do formuláře křivky zrnitosti vynášíme na vodorovnou osu  $x$  průměr zrn  $d$  [mm], které jsme získali pomocí Cassagrandeho nomogramu a na svislou osu  $y$  **kumulativní procentuální podíl částic** [%].

Podíly zrnitostních frakcí vzorků L 21 – L 28 jsou zaznamenány v tabulce (Tab. 16).

Zatřídění jednotlivých vzorků L 21 – L 28 dle příslušných norem a tvary křivek zrnitosti hrubozrnných vzorků L 21 – L 25, L 27 a L 28 jsou uvedeny v tabulce (Tab. 17).

Výsledek zkoušky plasticity jemnozrnného vzorku L 26 je zobrazen v tabulce (Tab. 18). Po laboratorním stanovení meze tekutosti a meze plasticity, jsem k vyhodnocení použila Diagram plasticity pro částice menší než 0,5 mm.

Výsledný profil svahové deformace je znázorněn v tabulce (Tab. 19).

Tab. 5: Výsledky síťového rozboru vzorku L 21.

Hmotnost vlhkého vzorku L 21 [g]	300,17						Celkem 285,61
Hmotnost suchého vzorku L 21 [g]	287,11						
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	
Nadsítné [g]	78,81	28,91	57,72	93,92	18,63	7,62	
Propad [g]	206,80	177,89	120,17	26,25	7,62		
Propad k celkové navážce Md [%]	72,41	62,28	42,07	9,19	2,67		

Tab. 6: Výsledky síťového rozboru vzorku L 22.

Hmotnost vlhkého vzorku L 22 [g]	301,45						
Hmotnost suchého vzorku L 22 [g]	295,75						Celkem
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	294,42
Nadsítné [g]	138,15	38,78	47,38	48,09	11,21	10,81	
Propad [g]	156,27	117,49	70,11	22,02	10,81		
Propad k celkové navážce Md [%]	53,08	39,91	23,81	7,48	3,67		

Tab. 7: Výsledky síťového rozboru vzorku L 23.

Hmotnost vlhkého vzorku L 23 [g]	301,27						Celkem 271,58
Hmotnost suchého vzorku L 23 [g]	272,94						
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	
Nadsítné [g]	16,90	17,78	48,35	116,93	44,74	26,88	
Propad [g]	254,68	236,90	188,55	71,62	26,88		
Propad k celkové navážce Md [%]	93,78	87,23	69,43	26,37	9,90		

Tab. 8: Výsledky síťového rozboru vzorku L 24.

Hmotnost vlhkého vzorku L 24 [g]	300,95						Celkem 269,06
Hmotnost suchého vzorku L 24 [g]	270,27						
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	
Nadsítné [g]	13,37	27,78	58,35	74,19	36,10	59,27	
Propad [g]	255,69	227,91	169,56	95,37	59,27		
Propad k celkové navážce Md [%]	95,03	84,71	63,02	35,45	22,03		

Tab. 9: Výsledky síťového rozboru vzorku L 25.

Hmotnost vlhkého vzorku L 25 [g]	300,82						
Hmotnost suchého vzorku L 25 [g]	279,54						Celkem
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	281,80
Nadsítné [g]	102,59	31,52	54,08	62,15	15,44	16,02	
Propad [g]	179,21	147,69	93,61	31,46	16,02		
Propad k celkové navážce Md [%]	63,59	52,41	33,22	11,16	5,68		

Tab. 10: Výsledky síťového rozboru vzorku L 27.

Hmotnost vlhkého vzorku L 27 [g]	300,18						Celkem
Hmotnost suchého vzorku L 27 [g]	272,42						
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	
Nadsítné [g]	5,82	4,77	24,96	133,73	67,82	34,96	
Propad [g]	266,24	261,47	236,51	102,78	34,96		
Propad k celkové navážce Md [%]	97,86	96,11	86,93	37,78	12,85		272,06

Tab. 11: Výsledky síťového rozboru vzorku L 28.

Hmotnost vlhkého vzorku L 28 [g]	300,6						
Hmotnost suchého vzorku L 28 [g]	285,14						Celkem
Otvor síta [mm]	2,00	1,00	0,63	0,25	0,125	< 0,125	284,69
Nadsítné [g]	100,67	40,21	58,92	63,14	11,09	10,66	
Propad [g]	184,02	143,81	84,89	21,75	10,66		
Propad k celkové navážce Md [%]	64,64	50,51	29,82	7,64	3,74		

Tab. 12: Výsledky hustoměrné (aerometrické) zkoušky vzorku L 23.

Vzorek L 23, hustoměr č. 647									
Datum	Absolutní čas	Relativní čas		Teplota [°C]	Oprava na T	Čtení hustoměru 647	Opravné čtení hustoměru R0	Průměr částice D dle nomogramu č. 647	Procentní zastoupení X [%]
		minuty	hodiny						
30.9.2013	17:11:15	1,5		22,5	0,5	1,0065	7,0	0,0600	3,7823
	17:14:45	5				1,0062	6,7	0,0310	3,6078
	17:24:45	15				1,0050	5,5	0,0185	2,9095
	18:09:45		1			1,0038	4,3	0,0090	2,2112
	19:09:45		2			1,0031	3,6	0,0062	1,8039
	21:09:45		4			1,0030	3,5	0,0045	1,7457
1.10.2013	17:09:45		24			1,0022	2,7	0,0018	1,2802

Tab. 13: Výsledky hustoměrné (aerometrické) zkoušky vzorku L 24.

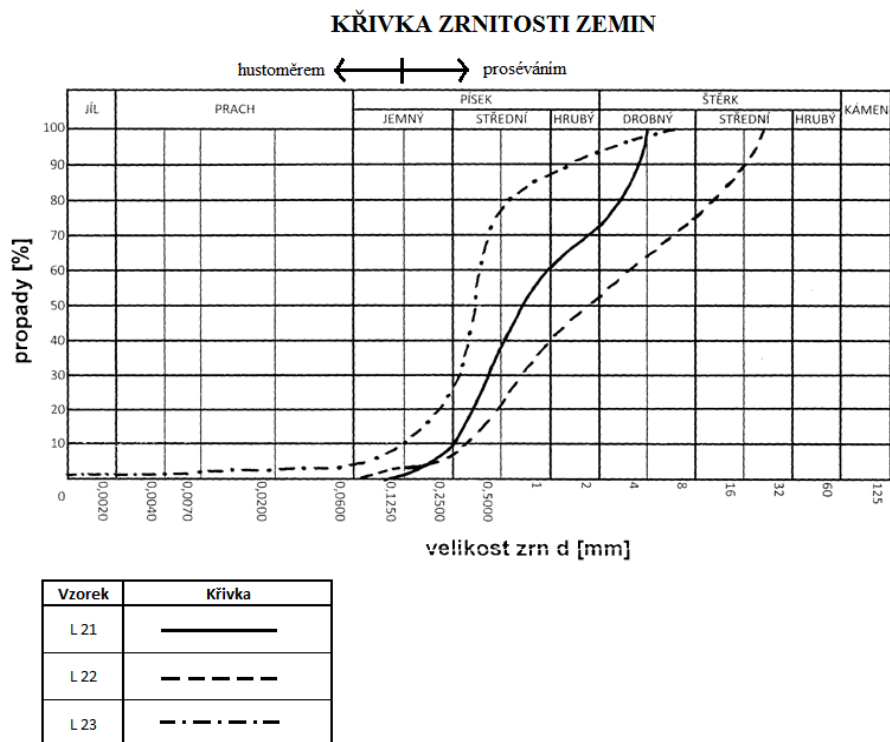
Vzorek L 24, hustoměr č. 102									
Datum	Absolutní čas	Relativní čas		Teplota [°C]	Oprava na T	Čtení hustoměru 102	Opravné čtení hustoměru R0	Průměr částice D dle nomogramu č. 102	Procentní zastoupení X [%]
		minuty	hodiny						
30.9.2013	17:28:30	1,5		22,5	0,5	1,0120	12,5	0,0630	7,0518
	17:32:00	5				1,0085	9,0	0,0330	5,0538
	17:42:00	15				1,0080	8,5	0,0190	4,8187
	18:27:00		1			1,0065	7,0	0,0092	3,8197
	19:27:00		2			1,0060	6,5	0,0064	3,5259
	21:27:00		4			1,0052	5,7	0,0047	3,0558
1.10.2013	17:27:00		24			1,0048	5,3	0,0019	2,8207

Tab. 14: Výsledky hustoměrné (aerometrické) zkoušky vzorku L 26.

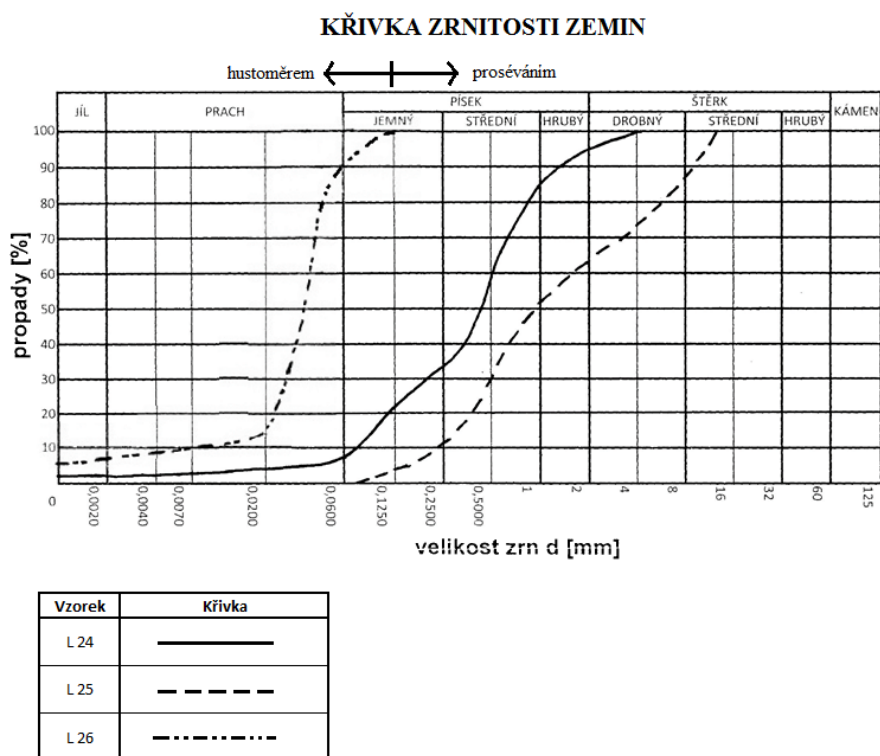
Vzorek L 26, hustoměr č. 673									
Datum	Absolutní čas	Relativní čas		Teplota [°C]	Oprava na T	Hustoměr čtení	Opravné čtení hustoměru R0	Průměr částice D dle nomogramu č. 673	Procentní zastoupení X [%]
		minuty	hodiny						
1.10.2013	16:56:30	1,5		22,5	0,5	1,0130	13,5	0,0310	23,9154
	17:00:00	5				1,0084	8,9	0,0200	15,4531
	17:10:00	15				1,0074	7,9	0,0190	13,6134
	17:55:00		1			1,0062	6,7	0,0091	11,4058
	18:55:00		2			1,0060	6,5	0,0075	11,0379
	20:55:00		4			1,0049	5,4	0,0065	9,0143
2.10.2013	16:55:00		24			1,0040	4,5	0,0018	7,3586

Tab. 15: Výsledky hustoměrné (aerometrické) zkoušky vzorku L 27.

Vzorek L 27, hustoměr č. 673									
Datum	Absolutní čas	Relativní čas		Teplota [°C]	Oprava na T	Čtení hustoměru 673	Opravné čtení hustoměru R0	Průměr částice D dle nomogramu č. 673	Procentní zastoupení X [%]
		minuty	hodiny						
30.9.2013	16:42:45	1,5		23	0,5	1,0080	8,5	0,0630	4,6641
	16:46:15	5				1,0042	4,7	0,0310	2,4486
	16:56:15	15				1,0022	2,7	0,0800	1,2826
	17:41:15		1			1,0011	1,6	0,0085	0,6413
	18:41:15		2			1,0010	1,5	0,0060	0,5830
	20:41:15		4			1,0002	0,7	0,0042	0,1166
1.10.2013	16:41:15		24			1,0001	0,6	0,0018	0,0583

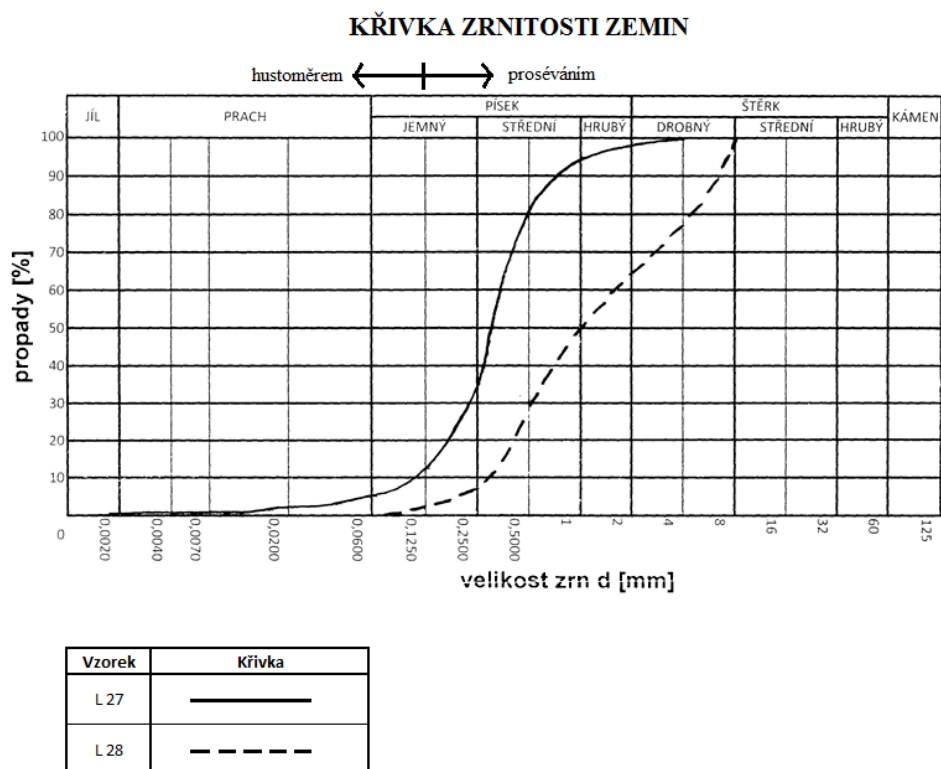


Obr. 46: Křivka zrnitosti zemin vzorků L 21, L 22 a L 23.



Obr. 47: Křivka zrnitosti zemin vzorků L 24, L 25 a L 26.





Obr. 48: Křivky zrnitosti vzorků L 27 a L 28.

Tab. 16: Procentní zastoupení frakcí ve vzorcích.

	Frakce	L 21	L 22	L 23	L 24	L 25	L 26	L 27	L 28
zastoupení [%]	Jemná + jemný písek	2,65	3,66	9,85	21,93	4,73	100,00	12,83	3,74
	Písek (0,125 - 2 mm)	69,90	49,63	83,96	73,12	58,57	0,00	85,03	60,96
	Štěrk (2 - 63 mm)	27,45	46,71	6,19	4,95	36,70	0,00	2,14	35,30

Tab. 17: Zatřídění vzorků L 21 – L 28.

Vzorek	Název zeminy (ČSN 73 6133)	Tvar křivky zrnitosti dle Cc (ČSN EN ISO 14 688-2)	Třída a symbol (ČSN 73 6133)	Symbol (ČSN EN ISO 14688 - 2)
L 28	Štěrk špatně zrněný	stejnozrná	G2 GP	grSa
L 27	Písek dobře zrněný	dobře zrněná	S1 SW	Sa
L 26	Jíl se střední plasticitou	X	F6 CI	CI
L 25	Štěrk dobře zrněný	dobře zrněná	G1 GW	grSa
L 24	Písek dobře zrněný	dobře zrněná	S1 SW	Sa
L 23	Písek dobře zrněný	dobře zrněná	S1 SW	Sa
L 22	Štěrk dobře zrněný	dobře zrněná	G1 GW	grSa
L 21	Písek špatně zrněný	stejnozrná	S2 SP	grSa

Tab. 18: Zatřídění jemnozrnného vzorku L 26 dle zkoušky plasticity.

Vzorek	Původní vlhkost, w (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	I <sub>c</sub>	Kvalitativní znaky		Plasticita (ČSN 73 6133)	Konzistence (ČSN 73 6133)
						Obsah jemno- zrnných částic f (%)	Poloha vůči čáře A diagra- mu plasticity		
L 26	36,55	40,00	14,60	25,40	0,22	90,02	nad	střední	velmi měkká

Tab. 19: Profil svahovou deformací v místě erozního zářezu dálnice D11 na 76. km od Prahy.

Genetický původ zemin a stratigrafické zařazení			Litologické složení	Zatřídění dle ČSN 73 6133	Geotechnický typ - šrafa	Výška profilu [m]	Vzorek
Kvartér	Antropogenní sedimenty		Heterogenní složení	Y	An	7,7 - 7,4	-
		Glacifluviální a terasové pleistocénní sedimenty	Šterkovité	G2 GP	Q3	7,4 - 6,6	L 28
			Píště	S1 SW	Q2	6,6 - 6,1	L 27
	Eolické sedimenty	Sprašové hlíny	Píště jíly	F6 Cl	Q4	6,1 - 5,7	L 26
		Glacifluviální a terasové pleistocénní sedimenty	Šterkovité	G1 GW	Q3	5,7 - 4,0	L 25
			Píště	S1 SW	Q2	4,0 - 3,2	L 23, L 24
			Šterkovité	G1 GW	Q3	3,2 - 1,1	L 22
			Píště	S2 SP	Q2	1,1 - 0,0	L 21

#### 4.3.4.2. Vyhodnocení zkoušky v translačním smykovém přístroji

Laboratorní kroky a zkoušky v translačním smykovém přístroji postupovaly podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a dle návodu ShearPLEX user manual (2004).

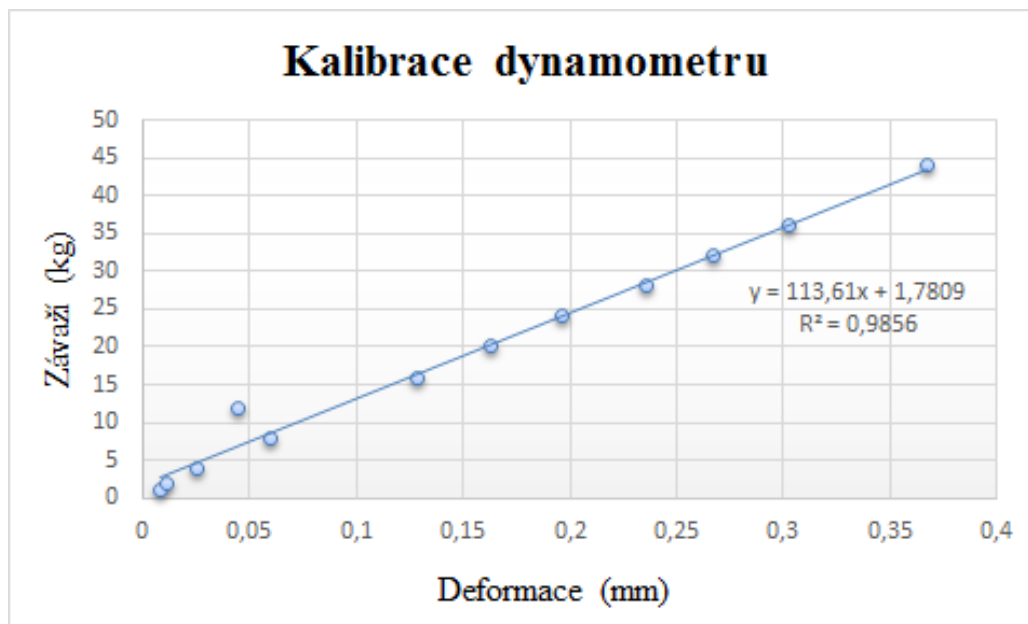
Zkouška na každém vzorku písku trvala jen okolo 1 hodiny (počítáno bez konsolidační fáze). Zatímco každá ze zkoušek na vzorcích jílu trvala cca 10 dní, opět počítáno bez konsolidační fáze. Délka konsolidační fáze totiž závisí na zvoleném normálovém zatížení, při kterém byl vzorek konsolidován. V průběhu trvání zkoušky jsem musela denně zalévat vzorkovou krabici, aby nedošlo k vysušení vzorku a zkreslení výsledných dat. Zkouška byla prováděna do takových přetvoření, aby bylo dosaženo kritické pevnosti.

Pro vyhodnocení zkoušky jsem použila Microsoft Excel, kam jsem importovala zaznamenaná data z přístroje – výška vzorku, posun smykové krabice, deformace dynamometru a čas zkoušky. Zápis těchto dat byl zaznamenáván v zadaných intervalech zvolených podle druhu materiálu. Intervaly zapisování jsem pro jíl zvolila 600s a pro písek 10s.

Po ukončení zkoušky jsem k výpočtu smykového napětí použila kalibrační křivku příslušného dynamometru (Obr. 49), umožňující přepočet mezi deformací a smykovou silou. Dynamometr jsem vyjmula ze smykového přístroje, položila jsem ho na pevnou vodorovnou podložku a postupně jsem na něj přidávala závaží a zapisovala hodnoty deformace v (mm), které

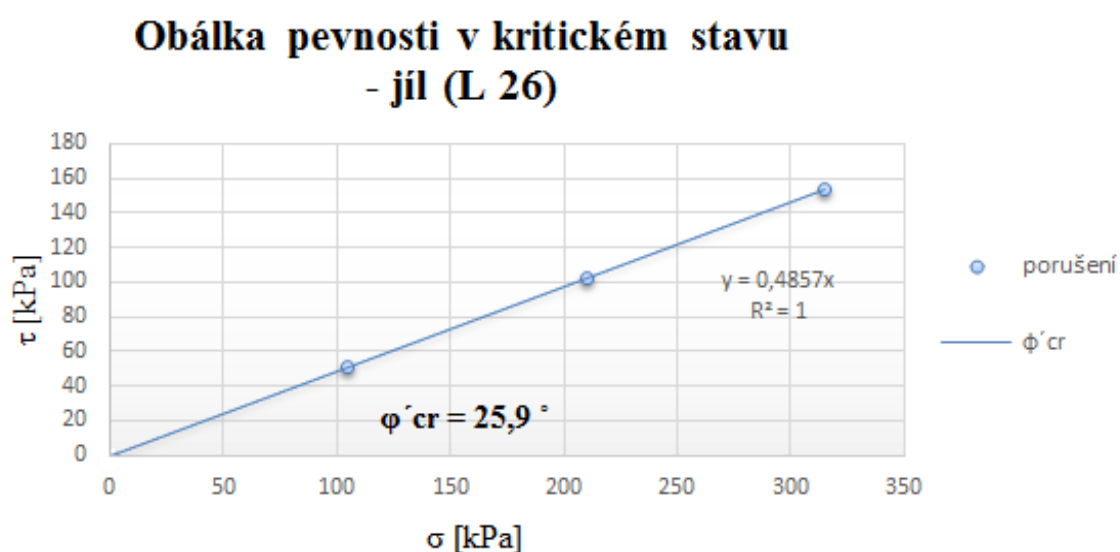


dynamometr ukazoval. Tímto jsem získala kalibrační křivku, která znázorňuje směrnicí, jak byl dynamometr deformován.



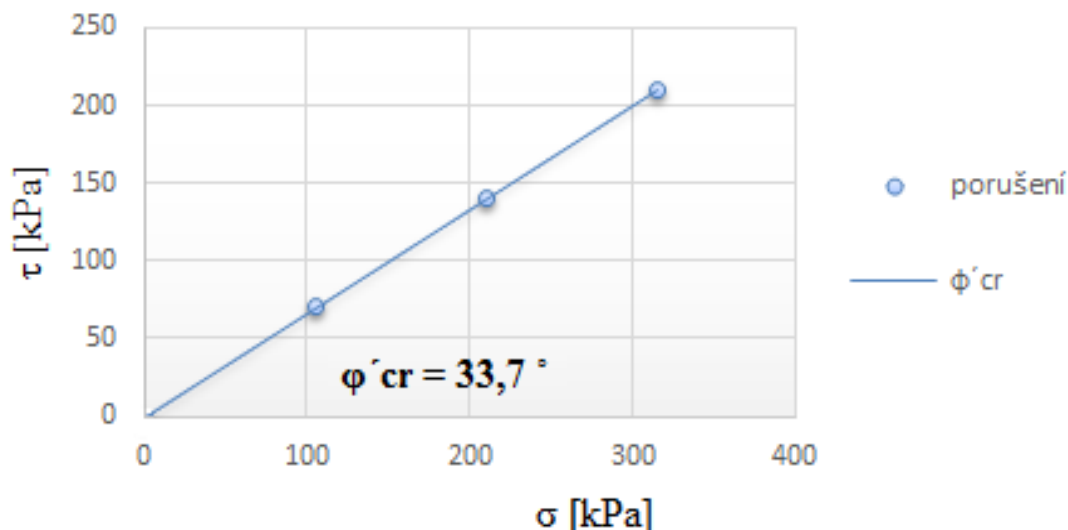
Obr. 49: Kalibrační křivka dynamometru translačního smykového přístroje po 1. zkoušce na vzorku jílu.

S pomocí kalibrační křivky dynamometru jsem spočítala výsledné smykové napětí v závislosti na posunutí (mm). Obálka pevnosti v kritickém stavu vzorku jílu je zobrazena na obrázku (Obr. 50) a obálka vzorku písku na obrázku (Obr. 51).



Obr. 50: Obálka pevnosti v kritickém stavu vzorku jílu (L 26).

## Obálka pevnosti v kritickém stavu - písek (L 27)



Obr. 51: Obálka pevnosti v kritickém stavu vzorku písku (L 27).

Po úplném ukončení přístroje a veškerých výpočtech jsou výsledkem ze zkoušek kritické smykové pevnosti v translačním smykovém přístroji v laboratoři hodnoty kritického úhlu vnitřního tření. Pro vzorek jílu (L 26) je  $\phi'_{cr} = 25,9^\circ$  a pro písek (L 27) je  $\phi'_{cr} = 33,7^\circ$ .

#### 4.4. Přehledná situace na lokalitě (práce v softwaru BricsCAD)

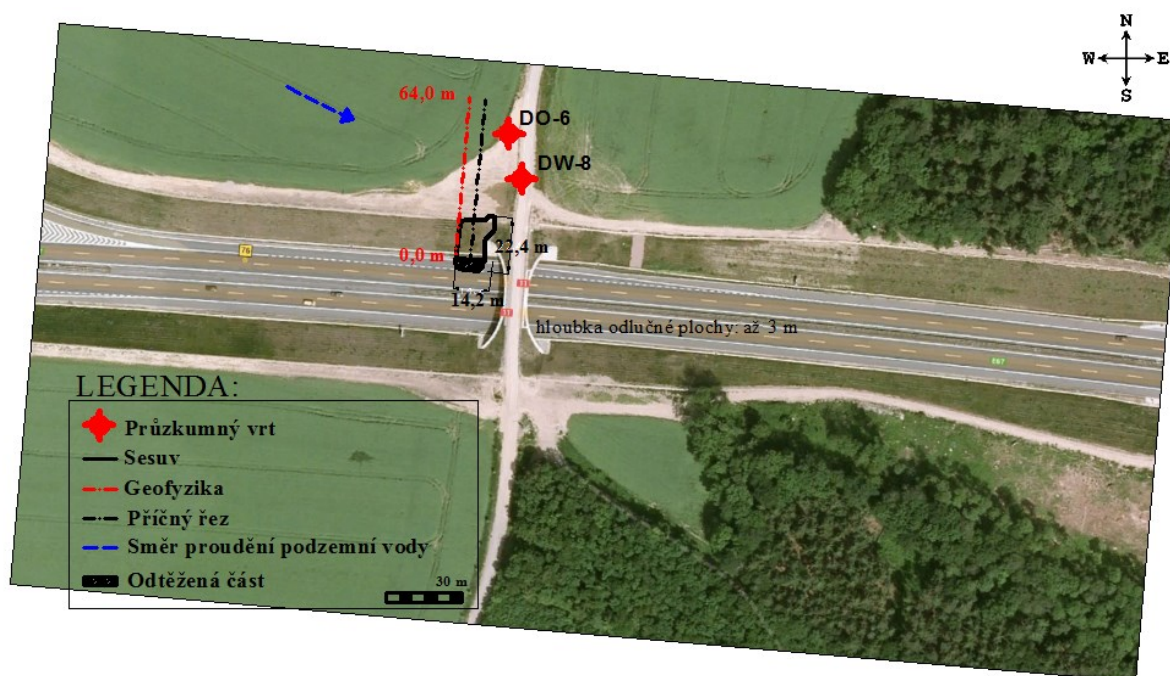
V Geofondu jsem se snažila vyhledat vrty, které by byly blízko mého příčného řezu, abych podle nich zjistila přibližnou geologii prostředí. Vyhledala jsem pouze 2 blízké vrty - vrt DW-8 a vrt DO-6. Na obrázku (Obr. 52) a v příloze ve zvětšeném měřítku (kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 1) je pozice vrtů názorně zakreslena. Vrt DW-8 je vzdálený 19 m a vrt DO-6 je vzdálený 36 m od koruny původního neporušeného svahu zářezu, který byl později postižen deformací, pokud tyto vrty promítneme na příčný řez (průmět vrtu DW-8 je 17,2 m a průmět vrtu DO-6 je 10,5 m).

Do programu BricsCAD jsem načetla výřez mapy z portálu <https://maps.google.cz/>. Zvolila jsem 2 libovolné body ve výřezu, díky těmto bodům jsem výřez srovnala do správného měřítku a zorientovala dle světových stran. Na mapě portálu <http://mapy.geology.cz/GISViewer/> jsem zjistila GPS souřadnice obou vrtů. Tyto souřadnice jsem převedla do souřadného systému S-JTSK, abych jejich přesnou polohu mohla zakreslit do výřezu.

Podle v terénu naměřených rozměrů deformace a přesného souřadnicového umístění jsem do výřezu nakreslila plochu svahové deformace a vyznačila jsem část, kde byl po deformaci nasunutý materiál, který byl poté odtěžen. Vykreslila jsem průběh geofyzikálního měření a průběh vedeného příčného řezu, který prochází svahovou deformací v místě, kde jsem odebírala vzorky.

Vyznačila jsem rozměry deformace a směr proudění podzemní vody, který jsem zjistila z portálu <http://mapy.cz/>. Zaznamenala jsem hloubku odlučné plochy. Vykreslila jsem legendu, měřítko a rozpisku.

Přehledná situace na lokalitě je vykreslena na obrázku (Obr. 52) a také je ve zvětšeném měřítku k nahlédnutí v přílohách (viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 1).



Obr. 52: Přehledná situace, svahová deformace, zářez dálnice D11, km 76. BricsCAD.

#### 4.5. Výpočet stability svahu zářezu dálnice D11

Pro posouzení stability svahu zářezu na dálnici D11 na zájmové lokalitě v den, kdy došlo k porušení, a pro návrh nejvhodnějšího sanačního opatření, jsem nejprve zvolila software SoilVision – SV Slope, který mi byl doporučen. Bohužel tento software během mé práce nezvládl natolik složité uložení geologických vrstev. Proto jsem musela zvolit jiný, více vhodný program - software GEO5.

Abych mohla namodelovat v programu GEO5 nejvíce realistickou situaci svahu v den, kdy došlo k porušení, a mohla tak vypočítat stabilitu svahu zářezu, zjistit umístění smykové plochy a průběh hladiny podzemní vody, použila jsem nejdříve pro vykreslení dané situace program BricsCAD.

*Software GEO5* je souborem počítačových programů, které umožňují řešit široké škály geotechnických problémů - jedním z nich je i výpočet stability svahu. Tento výpočet je založený na analytických postupech a umožňuje návrh a posouzení konstrukce. Program pracuje s normami a dodržuje požadované postupy (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014).

#### 4.5.1. Práce v softwaru BricsCAD

V programu BricsCAD jsem dle naměřených hodnot z vlastního terénního průzkumu vykreslila přesnou geometrii svahu (příčný řez) dle rozměrů neporušeného svahu v těsné blízkosti deformace.

Do obrázku jsem podle zjištěných informací ze zpráv z Geofondu zakreslila oba vrty (Obr. 53 a Obr. 54 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 2 a 3). Vrtly jsem vykreslila podle jejich vzdáleností od koruny svahu, podle průmětu od zvoleného příčného řezu a jejich hloubek od povrchu. Vrt DW-8 má průmět 17,2 m vlevo od řezu a vrt DO-6 má průmět 10,5 m vlevo od řezu. Vynesla jsem zjištěnou geologii ve vrtech. Ve zprávách byl také údaj o výšce hladiny podzemní vody, ve vrtu DW-8 ve výšce 3,10 m pod povrchem a ve vrtu DO-6 ve výšce 2,83 m pod povrchem. Hladinu jsem dle těchto dvou údajů zaznamenala do výkresu a dále jsem odhadla a dokreslila její průběh až pod dálnici, kde pravděpodobně končí v dálniční drenáži.

Zvolila jsem si nadmořskou výšku srovnávací roviny a to 20 m od ústí vrtu směrem pod povrch, tedy v úrovni 248 m n.m. Ústí vrtů jsou ve výšce 268 m n.m.

Výkres jsem podložila řezem z geofyzikálního odporového měření ERT, které ukazuje přibližnou geologickou situaci pod terénem.

V této fázi jsem mohla pro vykreslení mnou odhadované geologie v celé ploše příčného řezu deformací propojit tato data:

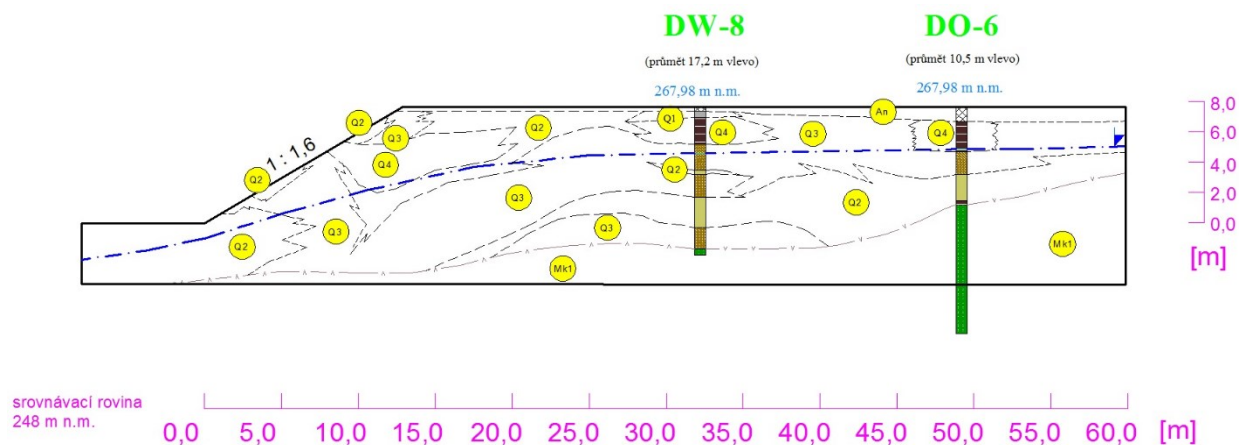
- přesně zjištěnou geologii ve vrtech DW-8 a DO-6 z archivních zpráv Geofondu;
- zjištěnou geologii z geofyzikálního odporového měření ERT (viz. níže a viz. kap. 4.5.1 *Práce v softwaru BricsCAD*, Obr. 54 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 3);
- laboratorně stanovený profil svahové deformace dle odebraných vzorků z terénního průzkumu (viz. kap. 4.3.4.1. *Vyhodnocení zatřídování zemin*, Tab. 19).

Nyní už mi zbývala nakreslit jen legenda použitých značek a šraf a rozpiska (Tab. 20).

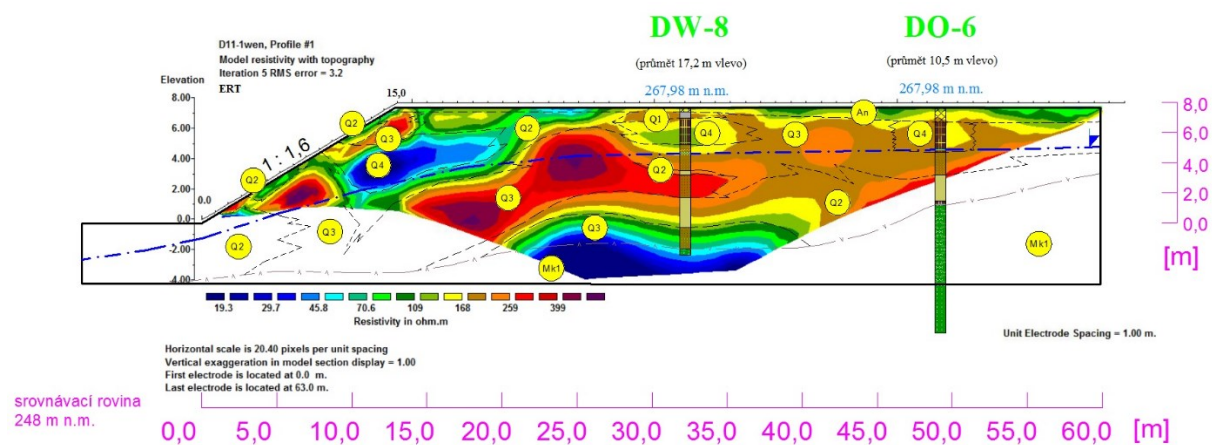
Výsledek své práce jsem znázornila v programu BricsCAD do dvou obrázků. Na prvním obrázku (Obr. 53) je znázorněna geometrie příčného řezu původním svahem, oba vrty s vyšrafovanou geologií a jejich průmětem k příčnému řezu, hladina podzemní vody, srovnávací rovina a mnou odhadovaná geologie. Tento obrázek je bez podložení geofyzikálního řezu ERT z důvodu lepší orientace v obrázku.

Na druhém obrázku (Obr. 54) je znázorněn příčný inženýrskogeologický řez původním svahem i s vyobrazením geofyzikálního řezu ERT, který představuje rozložení měrného elektrického odporu (tzv. rezistivity) pod povrchem. Hloubkový dosah je limitován maximální vzdáleností proudových elektrod (63 m) a rovněž vlivem reliéfu. Nízké hodnoty měrného odporu  $< 20 \Omega.m$  představují velmi vodivou zónu zachycenou ve spodní části ERT profilu, navíc pouze v oblasti s největším hloubkovým dosahem měření. Dle vrtu DW-8 se jedná o marinní mírně zvětralé slínovce (Mk1). Oblast s odpory cca 20-40 (60)  $\Omega.m$  potom reprezentují sedimentární polohy tvořené buď saturovaným jemnozrnným materiálem anebo přímo jílovitými polohami. Velmi pravděpodobně se tedy jedná o spraše (písčité jíly), které byly identifikovány ve vrtu DW-8 (Q4). Hodnotám měrného odporu  $> \sim 70 \Omega.m$  (tedy až stovkám  $\Omega.m$ ) odpovídají hlinito-písčité (Q1) až písčité polohy (Q2) v rámci geologického profilu a představují hodnoty v řádu prvních stovek  $\Omega.m$ , zatímco štěrkovité polohy (Q4) se na ERT řezu projevují jako zóny s výrazně vyššími odpory (vyšší stovky ohmmetrů). Mělká vrstva antropogenně obdělávané půdy (cca do 1 m) (An) je na ERT řezu rovněž patrná, a to jako přípovrchová vrstva se sníženými hodnotami odporů ( $< 100 \Omega.m$ ). Celkově tak ERT invertovaný odporový řez znázorňuje situaci pod zemským povrchem. Modelované hodnoty měrného odporu poměrně dobře korespondují s informacemi získanými jednak z vrtů (DW-8 a DO-6), tak i se zrnitostním rozbořem odebraných vzorků zemin.

Oba obrázky jsou ve zvětšeném měřítku k nahlédnutí v přílohách (viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 2 a 3).



Obr. 53: Příčný inženýrskogeologický řez svahem zářezu dálnice D11, km 76. BricsCAD.



Obr. 54: Příčný inženýrskogeologický a řez svahem s podloženým geofyzikálním řezem ERT. BricsCAD.

Tab. 20: Legenda použitých šraf a značek a rozpiska k Obr. 54 a Obr. 55.

## LEGENDA POUŽITÝCH ŠRAF

Genetický původ zemin a stratigrafické zařazení		Litologické složení	Zatřídění dle ČSN 73 6133	Geotechnický typ - šrafa	
Kvartér	antropogenní sedimenty	heterogenní složení	Y	An	
	glaciřluviální a terasové sedimenty	hlinitopísčité	F3 MS	Q1	
		písčité	S1, S2	Q2	
		šterkovité	G1, G2	Q3	
	eolické sedimenty	sprašové hlíny	F6 CI	Q4	
Svrchní křída - svrchní turon - coniak	marinní sedimenty	mírně zvětralé slínovce	R3	Mk1	

## LEGENDA ZNAČEK

	geotechnický typ
-----	rozhraní mezi vrstvami kvartéru
— v — v —	tektonické rozhraní kvartéru a svrchní křídý
268,97 m n.m.	nadmořská výška vrtu
DW-8	archivní sondy z HG průzkumu
————	stávající terén
— . — . —	hladina podzemní vody

## ROZPISKA

VYPRACOVALA:	KRESLILA:
Bc. Petra Rotová	Bc. Petra Rotová
AKCE:	
Dálnice D11 na Hradec Králové, km 76	
Geotechnický průzkum	
NÁZEV:	
Příčný inženýrskogeologický řez	

### 4.5.2. Práce v softwaru GEO5

Poté, co jsem v programu BricsCAD vše vykreslila, pokračovala jsem ve své práci v programu GEO5 podle GEO5 - Uživatelská příručka (2014).

Do programu jsem importovala vykreslenou geologii a geometrii příčného řezu svahem z obrázku vykresleného v BricsCADu. Obrázek jsem rozdělila na půl a pro výpočet stability svahu jsem počítala jen s levou částí, pravá část již výpočet nijak neovlivňuje. Dle importované geologie jsem vykreslila hranice mezi jednotlivými druhy zemin - vznikly tzv. polygony, podle kterých pak probíhal výpočet. Ke každému polygonu byl přiřazen index (Obr. 57, Obr. 58 a Obr. 61 a také ve zvětšeném měřítku viz. 8. Přílohy, Příloha č. 4, 5 a 6). Jednotlivé indexy jsou vysvětleny v příloženém dokumentu (viz. kap. 9. Textová dokumentace).



Jednotlivým zeminám jsem nastavila příslušnou šrafu, barvu šrafy a kritické parametry podle tabulkových hodnot.  $\varphi'$   $c$  pro jíl a písek jsem dosadila dle dosažených laboratorních výsledků. Parametry, které jsem do výpočtu dosadila, jsou vypsány v tabulce (Tab. 21).

Dosažené parametry zemin do výpočtu nejsou zcela kritické ale pouze téměř kritické, a to z toho důvodu, že jsem za  $c$  (soudržnost) dosadila nenulovou hodnotu. Nenulovou soudržnost ( $c > 0$ ) jsem zvolila proto, aby optimalizovaná smyková plocha byla v realistických pozicích (aby se „zakusovala“ do masivu).

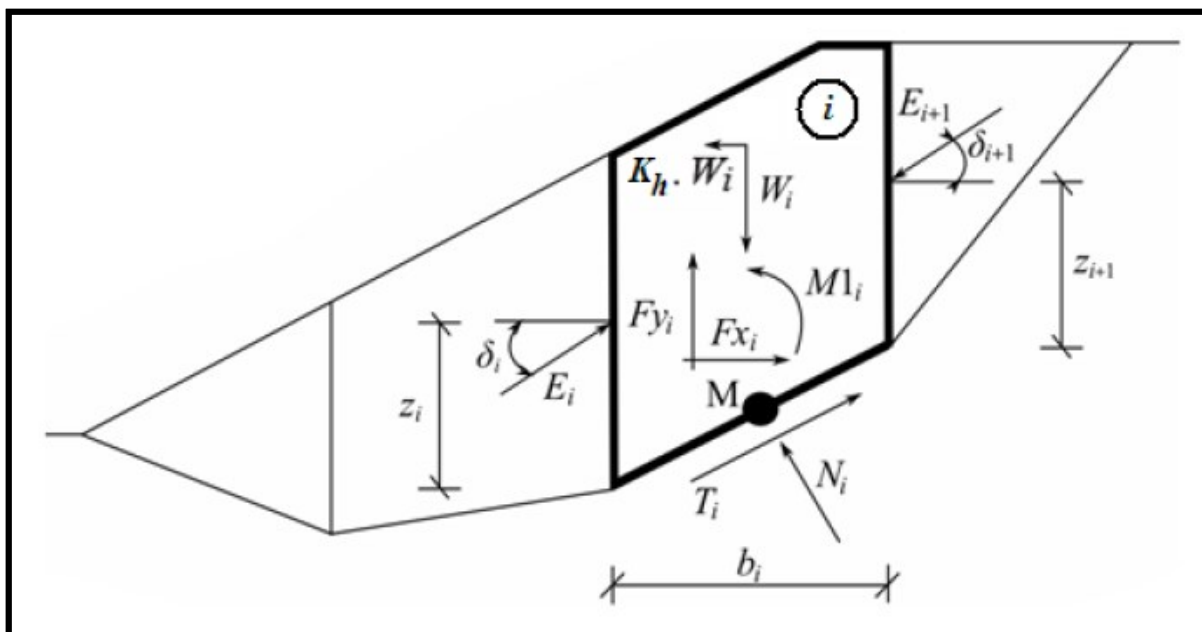
Tab. 21: Dosažené parametry zemin do výpočtu.

<b>Parametry zemin</b>	
<b>písek</b>	
Objemová tíha :	$\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 33,70^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 1,00 \text{ kPa}$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 19,00 \text{ kN/m}^3$
<b>štěrk</b>	
Objemová tíha :	$\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 40,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 1,00 \text{ kPa}$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 19,00 \text{ kN/m}^3$
<b>jíl</b>	
Objemová tíha :	$\gamma = 20,50 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 25,90^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 3,00 \text{ kPa}$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 20,50 \text{ kN/m}^3$

Abych našla stav porušení svahu, hledala jsem hodnotu **stupně bezpečnosti** (FS) rovnou 1,0. Stupeň bezpečnosti je poměr maximální smykové pevnosti k mobilizované smykové pevnosti. Jako nejvhodnější metodu výpočtu stability svahu jsem zvolila *Spencerovu proužkovou metodu mezní rovnováhy*.

### Spencerova metoda

Spencerova metoda je obecná proužková metoda mezní rovnováhy. Je založena na splnění rovnováhy sil i momentů na jednotlivých blocích. Bloky vzniknou rozdělením oblasti zeminy nad smykovou plochou dělicími rovinami. Statické schéma bloků a sil, které na ně působí, je zachyceno na obrázku (Obr. 55). (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014).



Obr. 55: Statické schéma – Spencerova metoda. (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014).

U každého bloku se předpokládá působení následujících sil:

- $W_i$ ..... tíha bloku, včetně přitížení, které má charakter tíhy (hmotné) a včetně vlivu součinitele vertikálního zemětřesení  $K_v$ ;
- $K_h * W_i$ ..... vodorovná setrvačná síla modelující účinky zemětřesení,  $K_h$  je faktor vodorovného zrychlení při zemětřesení;
- $N_i$ ..... normálová síla na smykové ploše;
- $T_i$ ..... smyková síla na smykové ploše;
- $E_i, E_{i+1}$ ..... síly, jimiž na sebe působí sousední bloky, jsou odkloněny od vodorovné o úhel  $\delta$ ;
- $F_{xi}, F_{yi}$ ..... ostatní vodorovné a svislé síly působící na blok;
- $M_{li}$ ..... moment od sil  $F_{xi}, F_{yi}$  otáčející kolem bodu **M**, což je střed  $i$ -tého úseku smykové plochy;
- $U_i$ ..... výslednice pórového tlaku na  $i$ -tém úseku smykové plochy.

Pro výpočet limitní rovnováhy sil a momentů na blocích jsou ve Spencerově metodě zavedeny následující předpoklady (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014):

- dělicí plochy mezi bloky jsou vždy svislé;
- paprsek tíhy bloku  $W_i$  prochází středem  $i$ -tého úseku smykové plochy, bodem **M**;
- normálová síla  $N_i$  působí ve středu  $i$ -tého úseku smykové plochy, v bodě **M**;
- sklon meziblokových sil  $E_i$  je konstantní pro všechny bloky a má hodnotu  $\delta$ , jen na počátku a na konci smykové plochy je  $\delta = 0$ .

Dále bylo zapotřebí optimalizovat polohu smykové plochy a zjistit tak její nejkritičtější polohu - hledala jsem polohu smykové plochy v momentě, kdy se FS rovnal hodnotě 1,0 a došlo tak k porušení svahu.

Při nastavování smykové plochy jsem zvolila dvě možnosti její polohy. Nejdříve jsem smykovou plochu nastavila pouze do horní části svahu (Obr. 57), tak jak jsem ji vypožadovala v terénu. Pro tento případ umístění plochy jsem pro ni v programu nastavila svislé omezení, aby se nezměnila její pozice. V druhém případě jsem smykovou plochu nastavovala v celém svahu, jelikož bylo třeba ověřit FS pro celý svah – zjistit všechny možnosti (Obr. 58). Oba obrázky jsou také ve zvětšeném měřítku k nahlédnutí v přílohách (viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 4, 5 a 6).

Pro zvolené případy jsem také nastavovala různé výšky hladiny podzemní vody. Vždy jsem spustila výpočet a sledovala jsem výsledné hodnoty FS. Různé možnosti jsem zkoušela do té doby, dokud FS nedosáhl hodnoty 1,0.

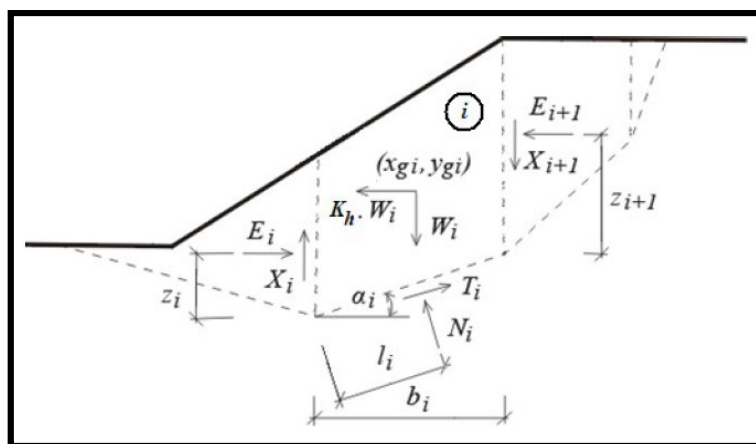
V mých výpočtech mi optimální hodnota FS pro porušení svahu se smykovou plochou v horní části vyšla rovna 0,92 a pro smykovou plochu v celém svahu vyšla hodnota 1,0. Tyto hodnoty jsem považovala za výsledné řešení. Tvar smykové plochy jsem zvolila polygonální, abych mohla nastavit její různé zakřivení.

Textová dokumentace výpočtu stability svahu (viz. kap. 9. *Textová dokumentace*).

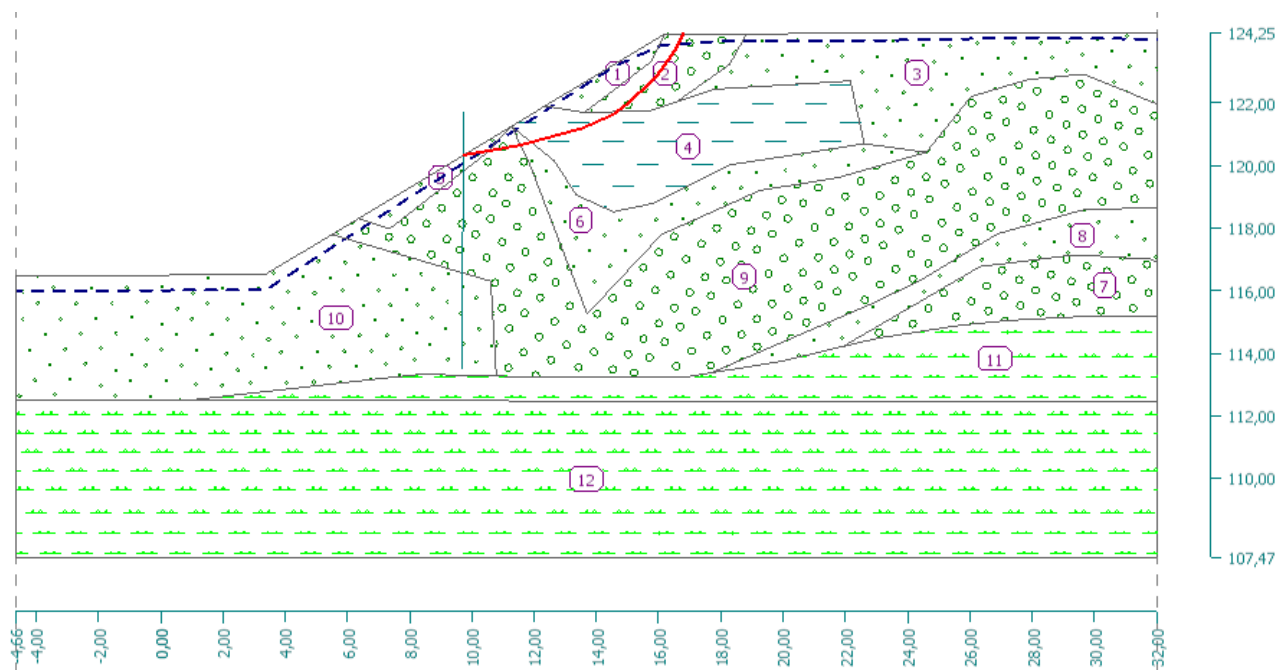
### **Polygonální smyková plocha**

Řešení stability svahu při použití polygonální smykové plochy (Obr. 56) spočívá v nalezení stavu mezní rovnováhy sil, které působí na zemní těleso nad smykovou plochou. Aby bylo možno tyto síly definovat, rozdělí se zemina nad smykovou plochou na bloky dělicími rovinami. Tyto dělicí roviny jsou zpravidla voleny jako svislé, ale není to nutná podmínka, např. Sarmova metoda počítá s obecně skloněnými dělicími rovinami. (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014).

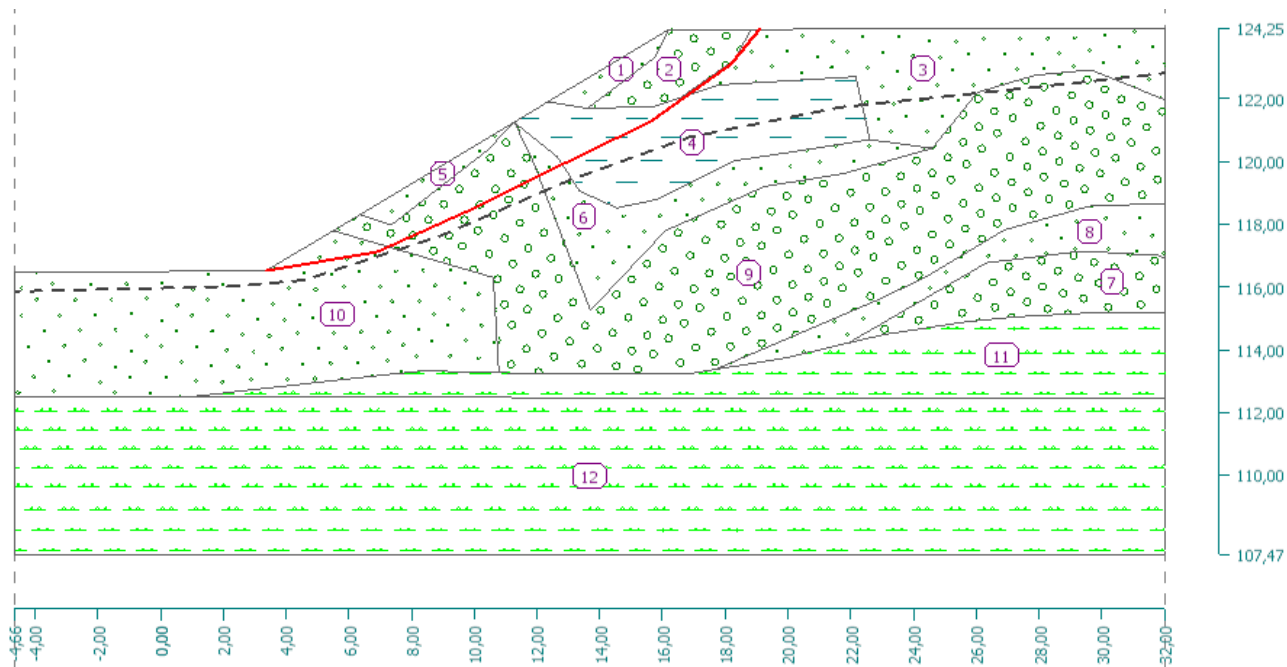
Na obrázku (Obr. 56) jsou znázorněny síly, které působí na jednotlivé bloky zeminy.



Obr. 56: Statické schéma bloku. Polygonální smyková plocha. (GEO5 - Uživatelská příručka, 2014).



Obr. 57: Příčný řez svahem, smyková plocha v horní části svahu (červeně). GEO5.



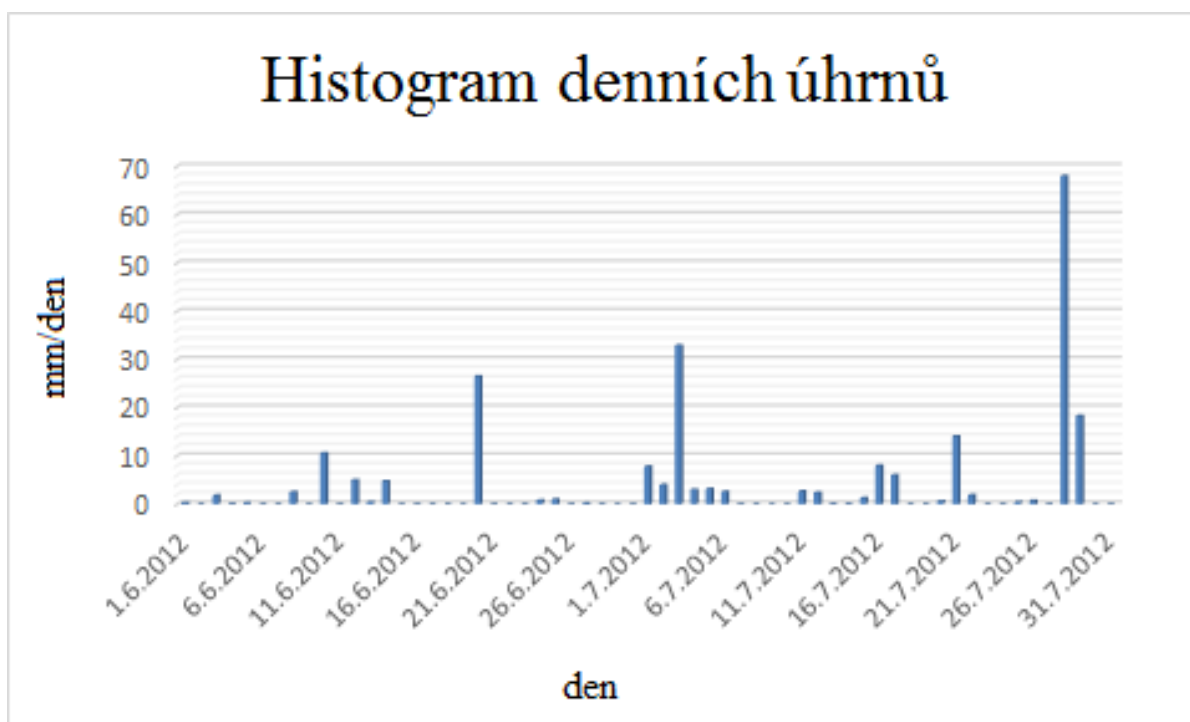
Obr. 58: Příčný řez svahem, smyková plocha prochází celým svahem (červeně). GEO5.

#### 4.6. Meteorologická situace

Počasí je samozřejmě skoro vždy jednou z příčin svahových deformací. Proto jsem se zaměřila i na tuto problematiku.

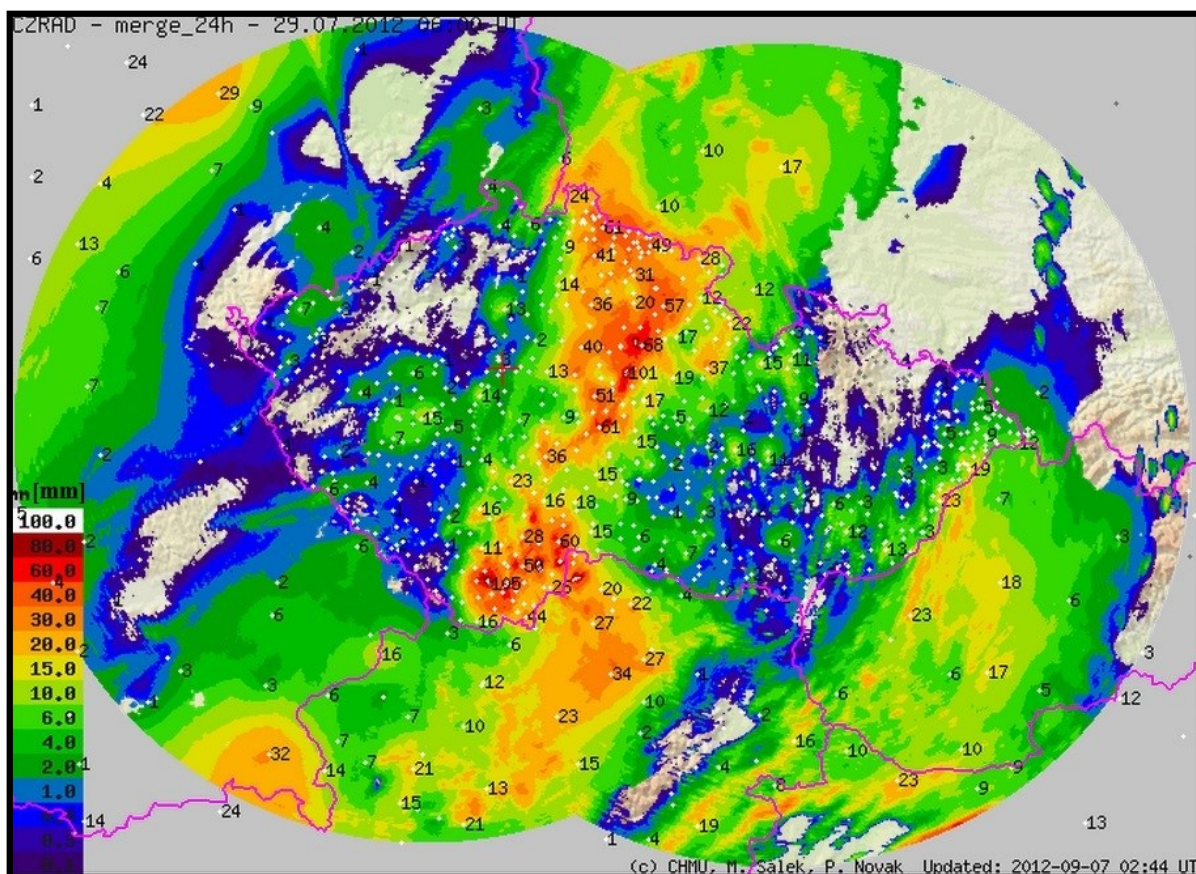
Nejbližší meteorologická stanice od mé lokality je manuální srážkoměrná stanice H3DOBC1 v jižní části obce Dobřenice a to pouhých 593 m severně (lokalizace: 50.143231 z.š., 15.638309 z.d., 230 m n.m.). Svahová deformace se udála 30.7.2012 a získaná data denních úhrnů z meteostanice jsou za dobu předešlých 2 měsíců (za červen a červenec 2012). Také jsem získala radarové odhady srážek ze dnů 28. a 29.7.2012 k 6. hodině následujícího dne.

Histogram denních úhrnů za 2 měsíce před svahovou deformací je znázorněn na obrázku (Obr. 59). Radarové odhady srážek ze dnů 28. a 29.7.2012 k 6. hodině následujícího dne jsou znázorněny na obrázku (Obr. 60).



Obr. 59: Histogram denních úhrnů za měsíc červen a červenec 2012. (ČHMÚ).





Obr. 60: Radarový odhad srážek z 28.7.2012 k 6. hodině následujícího dne. (ČHMÚ).

Z naměřených dat je zřejmé, že srážky v měsíci červenci roku 2012 byly v dlouhodobém průměru na území České republiky normální, ve východních Čechách mírně nadnormální. Spadlo zde v úhrnu 152 mm srážek, což odpovídá 146 % normálu. V průběhu měsíce se vyskytlo několik významných srážkových událostí, kdy v bouřkách spadly poměrně významné úhrny srážek. Již na začátku měsíce se bouřky vyskytly na přecházející studené frontě. Od jihozápadu přes severozápadní polovinu Čech postupovala linie bouřek, kdy na stanici Dobřenice spadlo téměř 8 mm srážek.

Silnější srážky na Hradecku byly pak zaznamenány v bouřkách 3. července, kdy přes území zvolna postupovala zvlněná studená fronta. I díky velmi teplému vzduchu, který před studenou frontou proudil nad naše území, se vytvořily silné bouřky. V Dobřenicích spadlo 33 mm srážek, v blízkosti byly zaznamenány i kroupy. (ČHMÚ).

Intenzivní krátkodobé srážky se udály také 21. července, kdy se v Čechách vytvořily bouřky postupující k VSV. Na Hradecku spadlo až 30 mm srážek, srážkoměr v Dobřenicích zaznamenal pouze 14 mm. (ČHMÚ).

Vysoké teploty a následně silné bouřky provázely závěr měsíce červenec. Vůbec nejvyšší úhrny byly naměřeny 28. července (2 dny před porušením) při postupu studené fronty od západu, která

přes východní Čechy přecházela až během odpoledne, kdy se teploty vzduchu vyšplhaly již poměrně vysoko, což napomohlo k vývoji silných bouří. Později odpoledne došlo k propojení dvou linií silných bouřek nad východní částí středních Čech a jejich dalšímu pokračování dále k SSV. Nejvíce srážek spadlo v 24hodinovém úhrnu na rozhraní Středočeského a Pardubického kraje (srážkoměr v Litošicích na Pardubicku naměřil 101 mm), ale lokálně mohly být úhrny srážek i o něco vyšší. Stanice v Dobřenicích naměřila tohoto dne 68 mm. Podle radarových odrazů zde nejsou vyloučeny ani kroupy, které byly zaznamenány na nedaleké meteorologické stanici s dobrovolným pozorovatelem v Novém Bydžově. Na území Královéhradeckého kraje byly zaznamenány stovky zásahů hasičů, mezi něž patřilo i odčerpávání vody. (ČHMÚ).

Během večera 29. července postupovala k východu v brázdě nízkého tlaku vzduchu podružná studená fronta, na níž se vytvořily silné a organizované bouřky. Postup těchto bouřek byl naštěstí rychlý, a proto nebyly zaznamenány tak vysoké srážkové úhrny jako v předešlý den. Stanice Dobřenice naměřila při této události 18 mm, stanice v kraji do 30 mm srážek.

Přivalové srážky v silných bouřkách jsou význačné svou intenzitou a prostorovou variabilitou. Nutno také podotknout, že při intenzivních srážkách může docházet k podhodnocení naměřených srážek naměřených srážkoměrem. Na malém prostoru jsou naměřené srážky také velmi variabilní. Srážky v místech vzdálených několik kilometrů mohou mít rozdíly více jak 100 mm. (ČHMÚ).

#### **4.7. Návrh sanace pro svahovou deformaci zářezu dálnice D11 (práce v softwaru GEO5)**

Pro studovaný případ svahové deformace v zářezu dálnice D11 se jako nejvhodnějším typem sanace jeví drenážní žebra, která jsem opět namodelovala v softwaru GEO5. Pro takovéto obdobné případy se nabízí jiná další opatření, jako např.: zmírnění sklonu svahu a přítěžovací lavice (hrubé kamenivo v patě svahu s odtěžením porušené části svahu). Avšak zmírnit sklon svahu v tomto případě není možné z vlastnických důvodů (pozemek za korunou svahu má jiného majitele). Vybudování přítěžovacích lavic je dle Pechmana (2008) sice jednoduchým řešením, je však závislé na nutnosti volného prostoru (řádově metry) v patě svahu. Jelikož studovaný poškozený svah zářezu přímo navazuje na dálnici D11 a instalace přítěžovacích lavic by zabrala nejméně celý odstavný pruh, není možné je z tohoto důvodu zde realizovat.

*Drenážní žebra* fungují tak, že v případě zvednutí hladiny podzemní vody tato žebra okamžitě odvádějí vodu pryč ze svahu, voda se pohybuje po jejich dně a stupeň bezpečnosti se už nikdy nedostane na hodnotu 1,0, kdy dojde k porušení svahu. Zásypovým materiálem je kulatý, špatně tříděný štěrk frakce 8/63 mm.

V programu modeluji pouze ideální řez žebrem. V BricsCADu jsem vykreslila drenážní žebro s vyústěním do silniční drenáže podle obvyklých způsobů provedení. Jeho rozměr byl kalibrován podle výpočtu. Navrhla jsem ho v hloubce 1,7 m od povrchu svahu. Žebro jsem

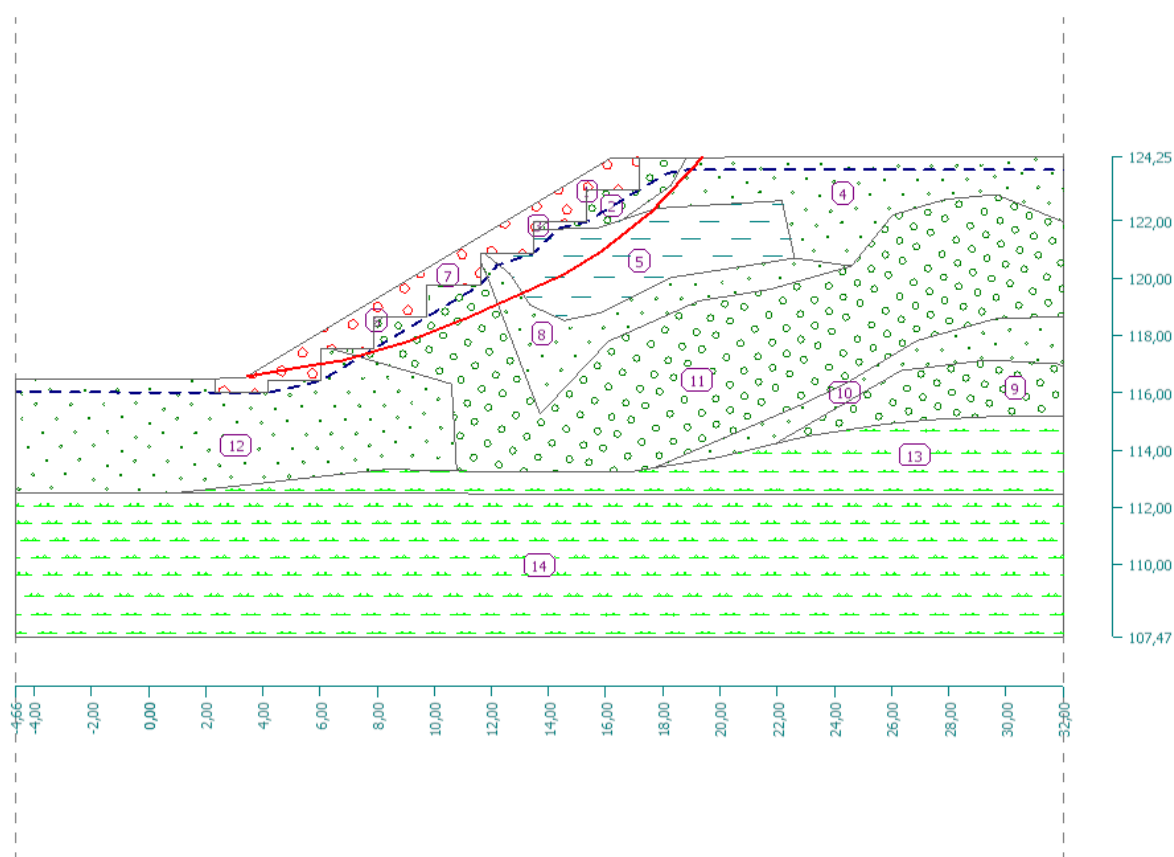


importovala do svého projektu v GEO5, nastavila jsem pro něj parametry, příslušnou šrafu, barvu šrafy a hladinu podzemní vody při dně žebra. Smykovou plochu jsem vykreslila po celé délce svahu a opět jsem zkoušela optimalizovat její umístění. Norma ČSN 73 6133 předepisuje pro kritické parametry  $FS = 1,15$ ; ale jelikož výpočet neprobíhá se zcela kritickými parametry, ale pouze s téměř kritickými ( $c > 0$ ), nastavila jsem FS na hodnotu 1,2 - tuto hodnotu jsem si určila. Po spuštění výpočtu vyšla hodnota stupně bezpečnosti rovna 1,34.

Tato sanační metoda není dotažná do konce, jelikož modeluji pouze ideální řez žebrem.

Příčný řez s drenážními žebry, vykreslenou smykovou plochou a výškou hladiny podzemní vody je zobrazen na obrázku (Obr. 61). Obrázek ve zvětšeném měřítku je k nahlédnutí v přílohách (viz. kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 6).

Textová dokumentace postupu provedeného výpočtu (viz. kap. 9. *Textová dokumentace*).



Obr. 61: Příčný řez svahem, sanace – drenážní žebra. GEO5.

## 5. DISKUZE

Za svahový pohyb v IG pojetí považuje Rybář et al. (1974) proces přemísťování horninových hmot po svahu účinkem zemské tíže, přičemž těžiště pohybujících se hmot vykonává dráhu po svahu dolů. Výsledkem svahového pohybu je *svahová deformace*. (Rybář et al., 1971). Svahové pohyby popisuje Rybář et al. (1974) za velmi různorodé geodynamické jevy, které vznikají při porušení stability svahu vlivem různých příčin. Za tyto příčiny považuje např.: geologické a hydrogeologické poměry, vliv vody i lidskou činnost. V předkládané práci jsem k příčinám deformace svahu zářezu dálnice D11 dospěla jeho analýzou. Výsledky všech provedených analýz ukázaly na příčiny porušení, kterých bylo několik.

### Příčiny porušení svahu:

- *Litologická predispozice* – téměř konformní uložení sedimentárních vrstev v horní části svahu se sklonem dálničního zářezu. Smyková plocha vznikla právě v tomto místě vlivem uložení vrstvy jílu, po které vodou nasycené vrstvy uloženého štěrku a písku ujely k patě svahu. Toto je znázorněno na modelu vykresleném v programu GEO5 (viz. kap. 4.5.2. *Práce v softwaru GEO5*, Obr. 57 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 4).
- *Mostek* – mostek, nacházející se v těsné blízkosti svahové deformace, v případě zvednuté hladiny podzemní vody a při proudění povrchové vody po terénu funguje jako bariéra. Voda se zde zarazí a akumuluje se. Směr proudění podzemní vody je přímo směrem do mostku. Směr proudění podzemní vody je znázorněn (viz. kap. 4.4. *Přehledná situace na lokalitě (práce v softwaru BricsCAD)*, Obr. 52 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 1).
- *Špatné odvodnění srážkové i podzemní vody* - za předešlé 2 měsíce (měsíc červen a červenec 2012) byla zhruba každých 7 dní zvýšená srážková činnost a bouřky. Dva dny před porušením svahu (28. července 2012) byly za poslední 2 měsíce v okolí lokality naměřeny nejvyšší úhrny srážek a silné bouřky. Nejvíce srážek spadlo na rozhraní Středočeského a Pardubického kraje (101 mm), ale lokálně mohly být úhrny srážek i o něco vyšší. Stanice v Dobřenicích naměřila v tomto dni 68 mm a kroupy.

Tyto srážkové události zapříčinily zvednutí *hladiny podzemní vody* až k povrchu terénu, došlo k poklesu stability svahu až na hodnotu  $FS=1,0$ ; vzniku smykové plochy v horní části svahu a k následné deformaci, což jsem prokázala (viz. kap. 4.5.2. *Práce v softwaru GEO5*, Obr. 57 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 4). V případě výpočtu stability se smykovou plochou v celém svahu byla dle modelu hladina podzemní vody pouze nepatrně zvýšená (viz. kap. 4.5.2. *Práce v softwaru GEO5*, Obr. 58 a kap. 8. *Přílohy*, Příloha č. 5).

- *Srážková voda* - vlivem velkého množství srážek se dopadající voda nestačila vsáknout do půdy, stékala tak po povrchu terénu (viz. kap. 4.2. *Terénní průzkum*, Obr. 35) a to způsobilo povrchovou erozi, splavení materiálu a jeho akumulaci pod svahem.

- *Sklon svahu* – dle normy ČSN 73 6133 je pro svahy zemního zářezu hloubky větší než 6 m doporučen sklon svahu mírnější než 1 : 1,75. V terénu jsem naměřila sklon svahu zářezu  $\alpha = 31^\circ$  (1 : 1,6).

Rybář et al. (1974) poukazuje na problém při určování hranice mezi ryze svahovými procesy a procesy, při nichž se zapojují transportační média. Ve studovaném svahu zářezu jsem analyzovala deformaci jako kombinaci sesuvu (se smykovou plochou v horní části svahu) a povrchové eroze (zvýšené množství srážek). Za spouštěcí mechanismus lze považovat srážkovou situaci, která předcházela samotné aktivaci svahové deformace ve formě drobnějšího sesuvu, jehož čelní část byla pravděpodobně transformována do formy proudového sesuvu nebo proudu (sensu Rybář et al., 1974). V kombinaci s nevhodně řešeným (nedostatečným) odvodněním v blízkosti příčné bariéry (mostku) a s příhodnými geologickými (uložení vrstev) a geotechnickými (sklon svahu zářezu) parametry tak došlo k vytvoření podmínek vhodných pro rychlý rozvoj studované svahové deformace.

K úspěšné analýze svahové deformace bylo zapotřebí učinit několik laboratorních zkoušek a modelových situací.

V terénu jsem na lokalitě dálkoměrem (TruPulse 360B) stanovila rozměry deformace, sklon svahu a hloubku smykové plochy, provedla jsem geofyzikální měření a přímo z profilu porušeného svahu jsem odebrala vzorky. Pro odběr vzorků nebylo nutné hloubit kopanou sondou, protože svah byl v důsledku vodní eroze sekundárně protnut erozní rýhou (strží), která tak vytvořila přirozené defilé, z něhož bylo možné vzorky odebrat. Vzorky jsem následně převezla do fakultní laboratoře mechaniky zemin a stanovila jsem dle skript Šimek (1964) a podle norem ČSN 73 6133, ČSN EN ISO 14 688–1, ČSN EN ISO 14 688–2, ČSN CEN ISO/TS 17 892–4 a ČSN ISO 3310-1 jejich zrnitostní složení a plasticitu u vzorku L 26 pro jejich zařazení. Dále jsem dle ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 a ShearPLEX user manual (2004) stanovila kritickou pevnost vzorku L 26 a L 27 pro zjištění pevnostních parametrů dosazovaných do stabilitních modelů.

V programu BricsCAD jsem vykreslila přehlednou situaci na lokalitě. V tomto programu jsem také vykreslila příčný řez svahovou deformací, ve kterém je podle podloženého geofyzikálního řezu ERT a terénního odběru vzorků zakresleno uložení jednotlivých zemin, přesné umístění průzkumných vrtů z archivních záznamů z Geofondu s průmětem k příčnému řezu a výška hladiny podzemní vody také z archivu Geofondu.

V programu GEO5 jsem modelovala stabilitu svahu Spencerovou proužkovou metodou mezní rovnováhy. Hledala jsem polohu smykové plochy a výšku hladiny podzemní vody v momentě, kdy se stupeň bezpečnosti FS rovná 1,0 a tedy dojde k porušení svahu. Zvolila jsem dvě možnosti výskytu smykové plochy, jednu odhadnutou z terénního průzkumu v horní části svahu a druhou v celém svahu pro zjištění všech možností. Různě jsem měnila výšku hladiny podzemní vody. Výsledkem byla nejkritičtější poloha smykové plochy a výška hladiny podzemní vody při porušení.

Dále bylo mým cílem navrhnout pro studovaný svah vhodnou sanaci. Bohátková (2007) při realizaci sanačního opatření po závalu východního portálu tunelu Hřebeč rozsáhlým sesuvem svahových sedimentů navrhla kombinaci přítěžovací lavice v patě nestabilního svahu, drenážního žebra s geotextilií a izolačního přísypu výchozu měkkých glaukonitických pískovců a zasíťování svislého skalního výchozu včetně jeho ukotvení za hranou výchozu po odstranění většiny nestabilních bloků. Zpracování projektové dokumentace dle Bohátkové (2007) proběhlo na základě výpočtů stability vyhodnocených specialisty. Pro studovaný svah v zářezu dálnice D11 jsem zvolila jako vhodné sanační opatření drenážní žebra, která okamžitě odvádí všechnu vodu pryč ze svahu, a nikdy již nedojde ke snížení faktoru stability na kritickou hodnotu 1,0. Sanační opatření jsem opět modelovala v programu GEO5.

V BricsCADu jsem vykreslila drenážní žebro s vyústěním do silniční drenáže podle obvyklých způsobů provedení. Jeho rozměr byl kalibrován podle výpočtu. Zakreslila jsem hladinu podzemní vody u dna drenážního žebra a zadávala jsem různé polohy smykové plochy v celém svahu. Výpočtem jsem stanovila stupeň bezpečnosti po sanaci a to na hodnotu 1,34. Hodnota vyhovuje zvolené hodnotě  $FS = 1,2$  a svah je tedy vlivem sanačního opatření stabilní. Jelikož jsem modelovala pouze ideální řez žebrem, tato sanační metoda není dotažná do konce.

Samozřejmě se pro druhy obdobného porušení dají navrhnout i jiné druhy sanace, jako např.: zmírnění sklonu svahu a přítěžovací lavice z hrubého kameniva. Ve studovaném případě tyto návrhy nejsou možné. Z vlastnických důvodů nelze zmírnit sklon svahu. Pro realizaci přítěžovacích lavic je dle Pechmana (2008) nutný volný prostor před svahem (řádově metry). V případě studovaného zářezu dálnice D11 vybudování přítěžovacích lavic není možné, jelikož dálnice přímo navazuje na patu svahu a toto opatření by zabralo nejméně celý odstavný pruh.

Doposud bylo na lokalitě provedeno pouze odtěžení akumulovaného materiálu u paty svahu a zához tohoto místa velmi hrubozrnnou zeminou – balvany o velikosti frakce ostrohrannými úlomky o velikosti cca 20 – 40 cm. V současnosti na lokalitě dochází k další erozi deštěm a vymílání materiálu směrem do svahu.

## 6. ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce si dávala za hlavní cíl stanovení příčin vzniku svahové deformace v zářezu dálnice D11 na 76. km a navrhnout pro tento případ vhodnou sanaci.

Všechny provedené zkoušky v laboratoři mechaniky zemin PřF UK proběhly úspěšně, zeminy byly zatříděny dle příslušných norem a získaná data byla vyhodnocena. V softwaru BricsCAD byla vykreslena přehledná situace na lokalitě a příčný řez podložený geofyzikálním řezem ERT, který poskytl nepřímou 2-D informaci o geologické situaci a doplnil tak bodové informace z dostupných blízkých vrtů. V softwaru GEO5 byla vymodelována stabilita svahu zářezu, určena poloha hladiny podzemní vody a poloha dvou zvolených (potenciálních) smykových ploch.

Následně bylo navrženo vhodné sanační opatření a určen stupeň stability, který vyhovoval normou stanovené hodnotě. Sanace drenážními žebry byla modelována v programu GEO5.

Byly určeny možné příčiny porušení svahu. Největším viníkem je zde velmi pravděpodobně špatně vyřešené odvodnění svahu - odvodnění povrchové i podzemní vody. Za spouštěcí mechanismus lze považovat srážkovou situaci, která předcházela samotné aktivaci svahové deformace ve formě drobnějšího sesuvu, jehož čelní část byla pravděpodobně transformována do podoby proudového sesuvu, který pokračoval až na samotné dálniční těleso.

Situace byla dočasně vyřešena, částečným odtěžením akumulace sesuvu a kamenným záhozem, který momentálně kryje nejproblematictější část deformace – ta je v současné době dále destabilizovaná soustředěným odtokem v podobě výrazného erozního zářezu (strže).

Na základě provedených analýz a modelů bylo následně navrženo vhodné sanační opatření a určen stupeň stability, který vyhovoval normou stanovené hodnotě. Sanace drenážními žebry byla modelována v programu GEO5.

Diplomová práce se tak pokusila pomocí dosažených výsledků i pomocí autorkou aplikované metodiky přispět k lepšímu poznání problematiky svahových deformací v silniční výstavbě.

Studium sesuvů, jejich prevence a zabezpečení pro všechny stavební a inženýrské práce, pro sestavování územních a zastavovacích plánů, pro trasování komunikací i pro vodohospodářské stavby, má patrný velký ekonomický význam.

## 7. CITOVANÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Bohátková, L.: *Sanace sesuvu na silnici I/35 u tunelu Hřebeč a jeho komplexní monitoring*. Geotechnika, roč. 10, březen 2007.

Česká geologická služba

Česká geologická služba ČGS a.s. – Geofond.

Český hydrometeorologický ústav – ČHMÚ: *Týdenní a měsíční přehledy centrálního pracoviště ČHMÚ*.

ČSN 72 1018: *Laboratorní stanovení relativní ulehlosti nesoudržných zemin*. Český normalizační institut. Duben 1970.

ČSN 73 6133: *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Český normalizační institut. Březen 2010.

ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4 (72 1007): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*. Český normalizační institut. Duben 2005.

ČSN CEN ISO/TS 17892 – 6 (72 1007): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 6: Kuželová zkouška*. Český normalizační institut. Duben 2005.

ČSN CEN ISO/TS 17892 – 10 (72 1007): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 10: Krabicová smyková zkouška*. Český normalizační institut. Duben 2005.

ČSN CEN ISO/TS 17892 – 12 (72 1007): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*. Český normalizační institut. Duben 2005.

ČSN EN ISO 14688 – 1 (72 1003): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídění zemin – Část 1: Pojmenování a popis*. Český normalizační institut. Červen 2003.

ČSN EN ISO 14688 – 2 (72 1003): *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídění zemin – Část 2: Zásady pro zatřídění*. Český normalizační institut. Březen 2005.

ČSN ISO 3310-1 (259610): *Zkušební síta. Technické požadavky a zkoušení. Část 1: Zkušební síta z kovové tkaniny*. Český normalizační institut. Červenec 2006.

Dikau, R. et al., 1996: *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. Wiley, 274 s.

GEO5 - Uživatelská příručka, 2014: *Uživatelská příručka*. Geotechnical software suite. Praha, 1152 s.

Goodman, R.E., 1993: *Engineering geology*. John Wiley & Sons, New York, 412 s.

Hájek, V., Mašín, D., Boháč, J.: *Závislost mechanického chování rekonstituované jemnozrnné zeminy na stupni překonsolidace*. GAUK 331/2004/B-GEO/PřF a GAUK 6/2006/R.

Hanzlíček, M. et al.: televizní pořad *Popularis : Nebezpečné svahy*. Praha, leden 2006.

Herle, V., 2007: *Stavební ročenka 2008*. JAGA, Praha, 176 s.

Hulla, J., Turček, P., 1998: *Zakladanie stavieb*. Jaga group, s.r.o., 332 s.

Karous, M., 1989: *Geoelektrické metody průzkumu*. SNTL/Alfa, Praha

Lee, E. M., Jones, D. K. C., 2004: *Landslide risk assessment*. Telford, London, 454 s.

Loke, M. H., 2001: *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*.

Matula, M., Pašek, J., 1986: *Regionálna inžinierska geológia ČSSR*. Alfa, Bratislava; SNTL, Praha, 296 s.

Murthy, V. N. S., 2003: *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. Dekker, New York, 1029 s.

Nemčok, A., 1982: *Zosuvy v Slovenských Karpatoch*. VEDA, Bratislava, 306 s.

Pánek, T., Šilhán, K., Tábořík, P., Hradecký, J., Smolková, V., Lenart, J., Brázdil, R., Kašičková, L., Pazdur, A., 2010: *Catastrophic slope failure and its origins: Case of the May 2010 Girová Mountain long – runout rockslide (Czech Republic)*. Elsevier Science & Technology, 13 s.

Pechman, J., Aldorf, J., 2008: *Inženýrské stavby 3/2008*. JAGA, Praha.

Poledňák, P., 2013: *Přírodní katastrofy a jejich řešení: Svahové pohyby*. Přednáška (3). Projekt: „Inovace studia v oblasti bezpečnosti dopravy - SAFETEACH“, číslo projektu CZ.1.07/2.2.00/15.0476. Praha, 37 s.

Rybář, J., Nemčok, A., Pašek, J., 1974: *Dělení svahových pohybů*. Sborník Geol. věd, č. 11, Praha, 77-97 s.

Rybář, J., Ondrášík, R., 1971: *Dynamická inžinierska geológia*. St. Pedag. Nakl., Bratislava, 267 s.



- Savarenskij, F., P., 1939. In: Záruba, Q., Mencl, V., 1987: *Sesuvy a zabezpečování svahů*. 1. vyd. Praha: Academia, Praha, 221 s.
- ShearPLEX User Manual, 2004: *ShearPLEX User Manual*. VJT 2700. VJ Tech Ltd, 17 s.
- Schuster, R. L., Krizek, R.J., 1978: *Landslides, analysis and control*. National Academy of Sciences, Washington, 234 s.
- Šimek, J., 1964: *Metodické pokyny pro dálkové studium z mechaniky zemin*. SNTL, Praha, 79 s.
- Turner, A. K., Schuster, R.L., 1996: *Landslides: Investigation and mitigation. Special report 247*. National Academy Press, Washington, D.C, 673 s.
- Varnes, D. J., 1978: Slope movement types and processes. In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- Záruba, Q., Mencl, V., 1929: *Sesouvání půd v Československu*. Praha, 384 s.
- Záruba, Q., Mencl, V., 1974: *Inženýrská geologie*. Academia, Praha, 511 s.
- Záruba, Q., Mencl, V., 1987: *Sesuvy a zabezpečování svahů*. Academia, Praha, 338 s.

### **Internetové zdroje:**

[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

<http://mapy.geology.cz>

<http://mapy.geology.cz/GISViewer/>

[http://mapy.geology.cz/svahove\\_nestability/](http://mapy.geology.cz/svahove_nestability/)

<http://www.geology.cz/svahovenestability/registr>

<http://heis.vuv.cz/>

<http://mapy.cz/>

<https://maps.google.cz/>

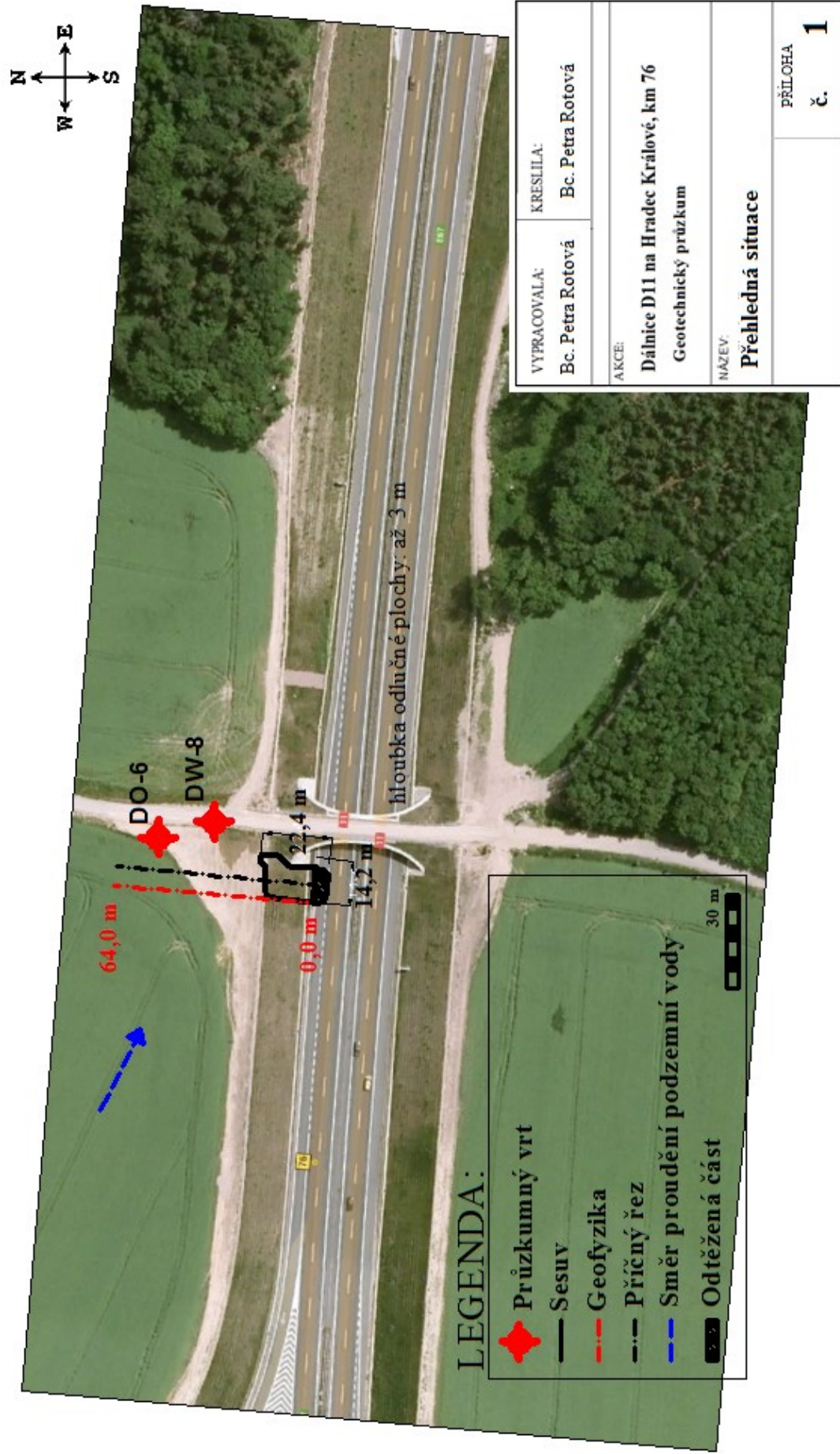
**Použité softwary:**

BricsCAD

CorelDRAW

GEO5

## **8. PŘÍLOHY**



VYPRACOVALA:	KRESILA:
Bc. Petra Rotová	Bc. Petra Rotová
AKCE:	
Dálnice D11 na Hradec Králové, km 76	
Geotechnický průzkum	
NÁZEV:	
Přehledná situace	
PŘÍLOHA	č. 1

DW-8

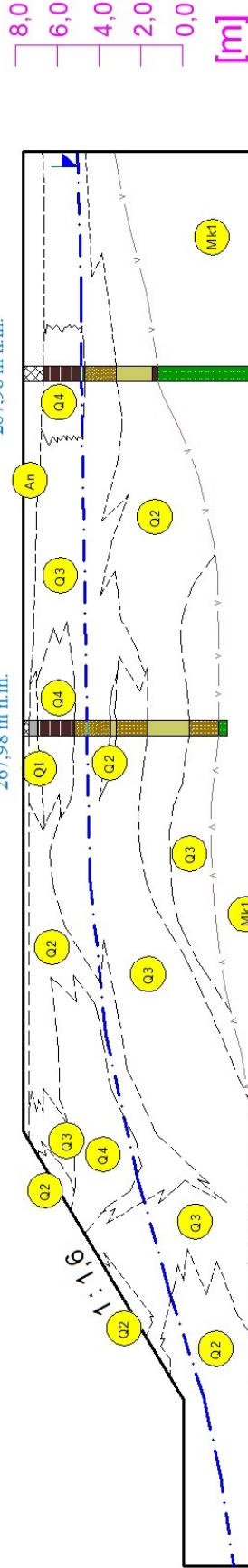
(průmět 17,2 m vlevo)

267,98 m n.m.

DO-6

(průmět 10,5 m vlevo)

267,98 m n.m.



srovnávací rovina  
248 m n.m.

0,0 5,0 10,0 15,0 20,0 25,0 30,0 35,0 40,0 45,0 50,0 55,0 60,0 [m]

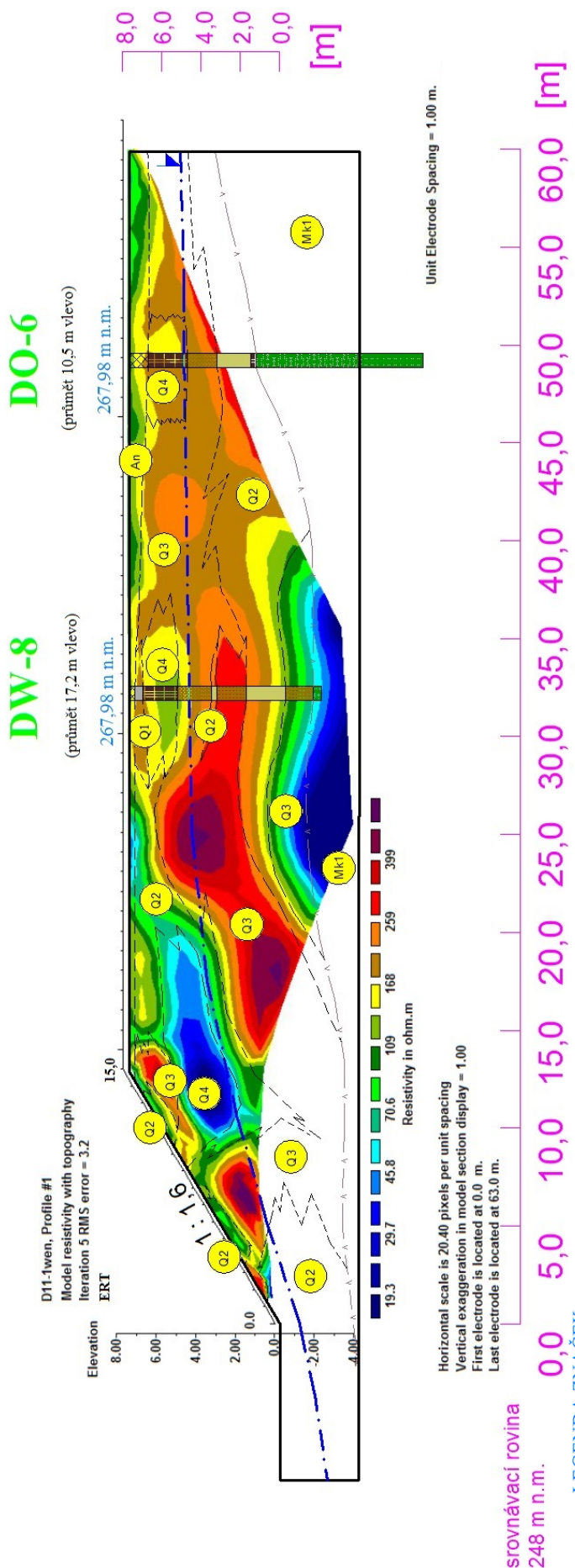
LEGENDA ZNAČEK

	geotechnický typ
	rozhraní mezi
	vrstevmi kvartéru
	tektonické rozhraní
	kvartéru a svrchní
	křídly
	nadmožská výška
	vrhu
	archivní sondy z
	HG průzkumů
	stávající terén
	hladina podzemní
	vody

LEGENDA POUŽITÝCH ŠRAF

Genetický původ zemin a stratigrafická zařazení		Litologické složení	Zařazení dle ČSN 73 6133	Geotechnický typ - šrafa
Kvartér	antropogenní sedimenty	heterogenní složení	Y	An
	glaciřovinná a terasové sedimenty	hlinitopíská	F3 MS	Q1
		píská	S1 S2	Q2
		šáklorité	G1 G2	Q3
Starší křída - sedimenty	glaciřové hlíny	píská jílů	F6 C1	Q4
	mořské sedimenty	hlíny	R3	Msl

VYPRACOVALA	KRESLILA
Bc. Petra Rotová	Bc. Petra Rotová
AKCE	
Dálnice D11 na Hradec Králové, km 76	
Geotechnický průzkum	
NAZEV	
Průřez inženýrsko-geologický řez	
PŘÍLOHA	
č. 2	



(m)	geotechnický typ
---	rozhnutí mezi
---	vrstvy kvartéru
---	tektonické rozhraní
---	kvartéru a svrchní
---	křídly
---	nadmořská výška
---	vrtu
---	archivní sondy z
---	HG průzkumu
---	stávající terén
---	hladina podzemní
---	vody

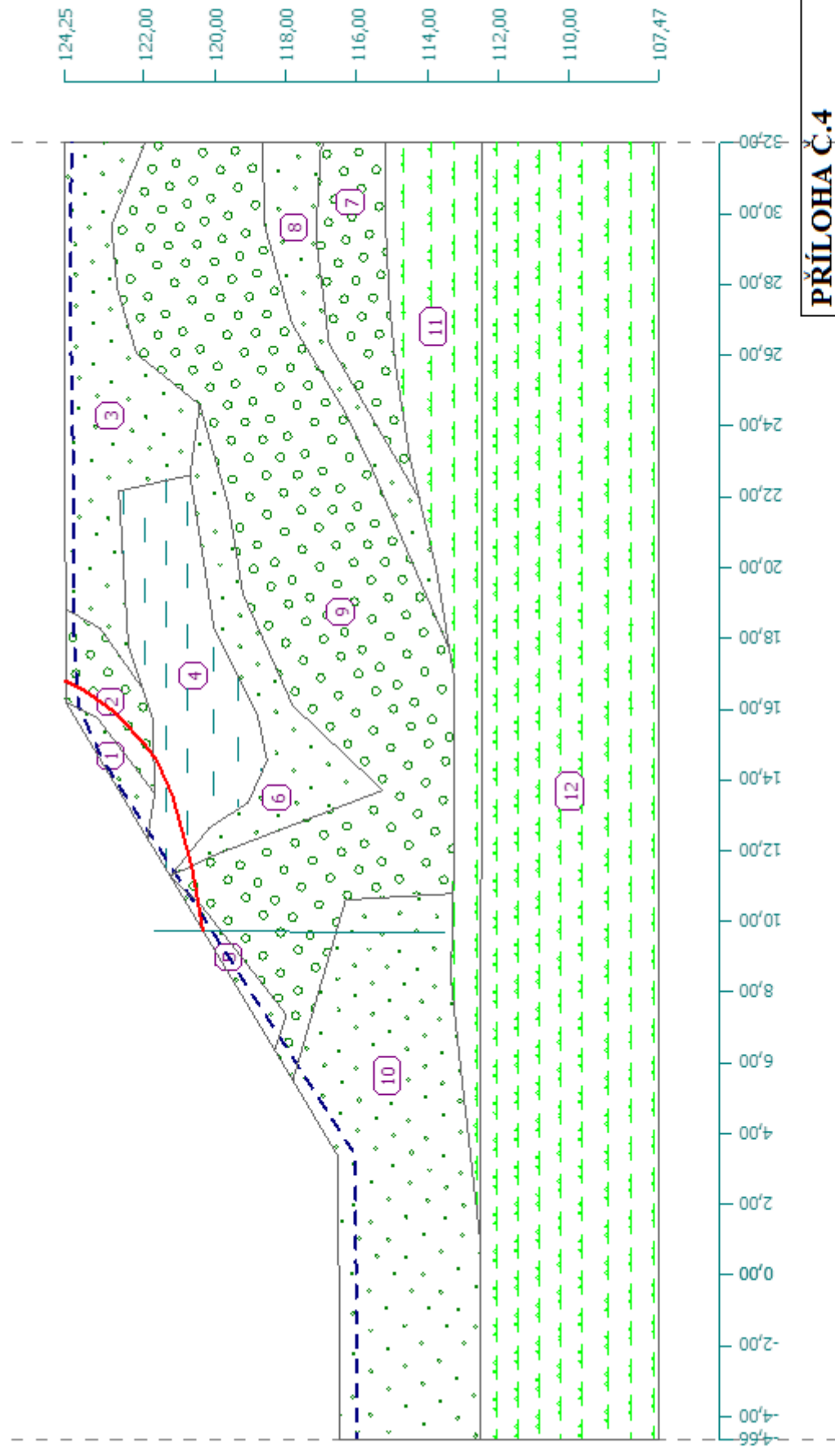
LEGENDA ZNAČEK

LEGENDA POUŽITÝCH ŠRAF

Geotický původ zemín a stratigrafické zařazení		Litologické složení		Zařazení dle ČSN 73 6133		Geotechnický typ - šrafa	
Kvartér	antropogenní sedimenty	bazaltogenní složení	Y	F3 M3	Q1	Q1	Q1
	glaciáluvádní a terasové	hlinitopíště		S1 S2	Q2	Q2	Q2
	sedimenty	piště		G1 G2	Q3	Q3	Q3
	sedimenty	šedkovitá		F6 C1	Q4	Q4	Q4
Problema - problema - problema	sedimenty	správné hlíny					
	marinní sedimenty	miřná zvětralá hlínovce	R3				

ROZPISKA

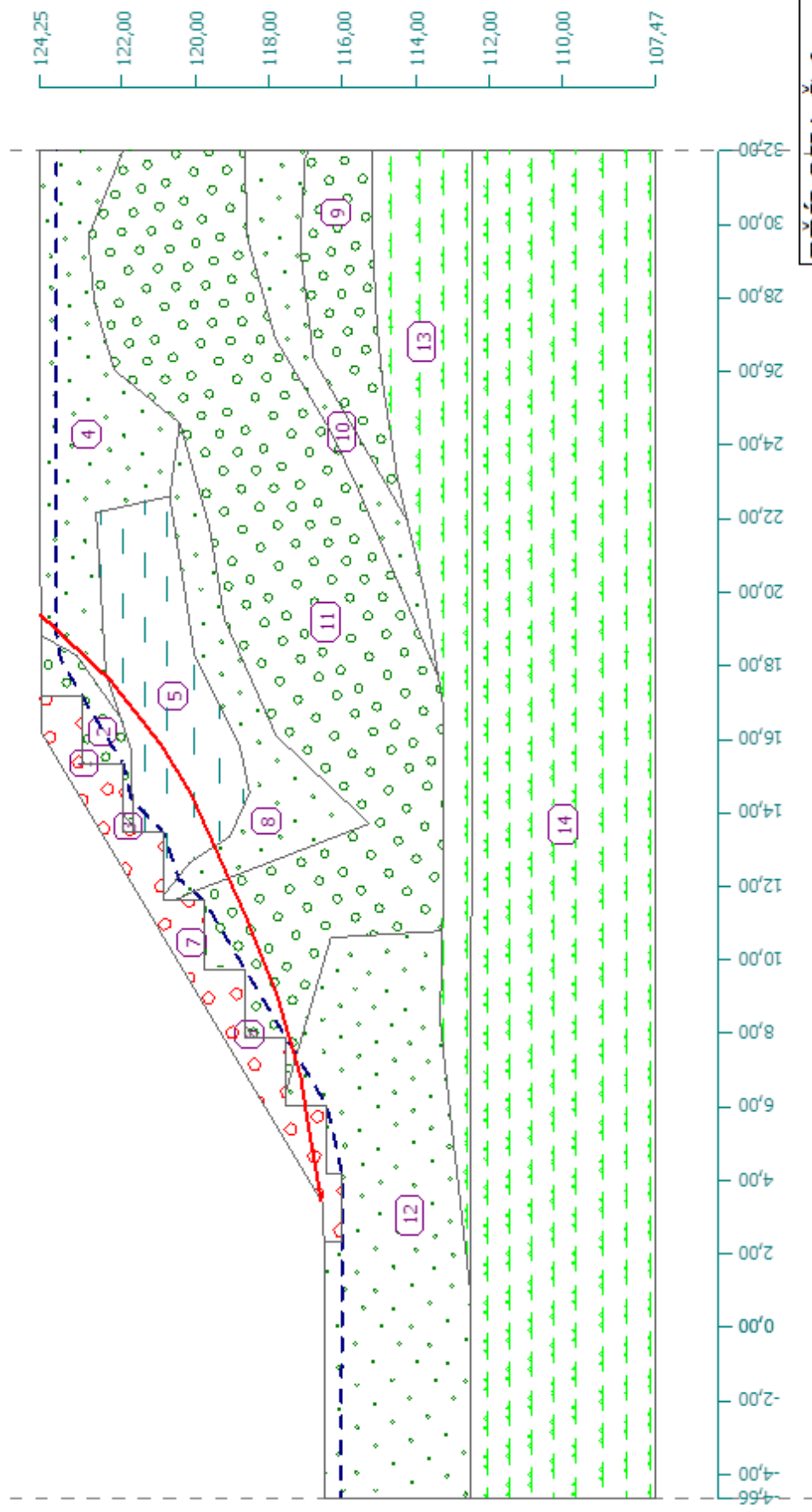
VYPRACOVALA	KRESLILA
Bc. Petra Rotová	Bc. Petra Rotová
AKCE	
Dálnice D11 na Hradec Králové, km 76	
Geotechnický průzkum	
NÁZEV	
Příčný inženýrsko-geologický a geofyzikální řez	
PŘÍLOHA	
č. 3	



**PŘÍLOHA Č.4**  
**PŘÍČNÝ ŘEZ**  
**SVAHEM, SMYKOVÁ**  
**PLOCHA V HORNÍ**  
**ČÁSTI SVAHU. GEO5.**







**PŘÍLOHA Č.6**  
**PŘÍČNÝ ŘEZ**  
**SVAHEM, SANACE**  
**- DRENÁŽNÍ**  
**ŽEBRA. GEO5.**

## **9. TEXTOVÁ DOKUMENTACE**

## Výpočet stability svahu

### Projekt

Datum : 24.7.2014

Typ výpočtu : v efektivních parametrech

### Rozhraní

Číslo	Umístění rozhraní	Souřadnice bodů rozhraní [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		-4,66	116,48	-4,65	116,48	3,35	116,51
		4,37	117,12	5,51	117,80	6,36	118,31
		7,35	117,98	10,40	120,34	11,28	121,26
		12,35	121,91	13,61	121,70	15,75	123,32
		16,21	124,22	18,83	124,22	32,00	124,25
2		12,35	121,91	16,21	124,22		
3		13,61	121,70	15,71	121,76	16,58	122,05
		18,28	123,24	18,83	124,22		
4		16,58	122,05	17,78	122,45	22,17	122,71
		22,61	120,70	24,60	120,43	26,04	122,21
		27,88	122,76	29,66	122,93	32,00	121,98
5		11,28	121,26	12,64	120,16	13,36	119,06
		14,54	118,52	15,80	118,79	18,31	120,03
		20,45	120,36	22,61	120,70		
6		6,36	118,31	11,28	121,26		

Číslo	Umístění rozhraní	Souřadnice bodů rozhraní [m]					
		x	z	x	z	x	z
7		11,28	121,26	11,81	120,18	12,77	117,69
		13,71	115,26	16,09	117,80	19,26	119,21
		21,77	119,62	24,60	120,43		
8		17,69	113,37	23,01	115,66	24,44	116,35
		26,89	117,82	29,73	118,61	32,00	118,64
9		5,51	117,80	10,61	116,31	10,79	113,27
10		21,94	114,22	26,33	116,77	29,36	117,15
		31,80	117,01	32,00	116,92		
11		0,78	112,48	6,18	113,09	8,36	113,33
		10,79	113,27	13,19	113,22	16,75	113,22
		17,69	113,37	19,95	113,74	21,94	114,22
		23,08	114,49	25,60	114,88	27,22	115,05
		29,75	115,18	31,89	115,18	32,00	115,18
12		-4,66	112,48	0,78	112,48	32,00	112,47

### Parametry zemin

#### písek

Objemová tíha :	$\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 33,70^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 1,00 \text{ kPa}$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 19,00 \text{ kN/m}^3$

#### štěrk

Objemová tíha :	$\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$
Úhel vnitřního tření :	$\varphi_{ef} = 40,00^\circ$
Soudržnost zeminy :	$c_{ef} = 1,00 \text{ kPa}$
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{sat} = 19,00 \text{ kN/m}^3$




**jíl**

Objemová tíha :  $\gamma = 20,50 \text{ kN/m}^3$   
 Úhel vnitřního tření :  $\varphi_{\text{ef}} = 25,90^\circ$   
 Soudržnost zeminy :  $c_{\text{ef}} = 3,00 \text{ kPa}$   
 Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{\text{sat}} = 20,50 \text{ kN/m}^3$

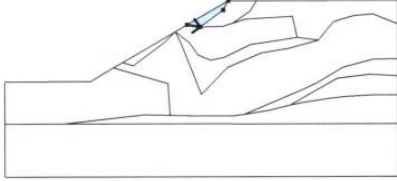
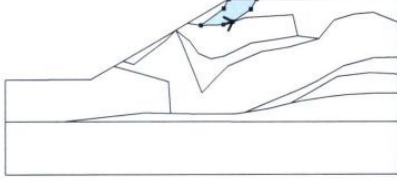
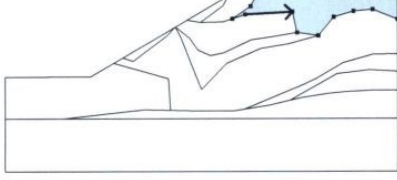
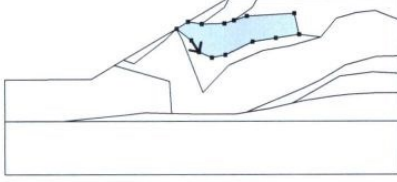
**žebro**

Objemová tíha :  $\gamma = 19,00 \text{ kN/m}^3$   
 Úhel vnitřního tření :  $\varphi_{\text{ef}} = 43,00^\circ$   
 Soudržnost zeminy :  $c_{\text{ef}} = 1,00 \text{ kPa}$   
 Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{\text{sat}} = 19,00 \text{ kN/m}^3$

**Tuhá tělesa**

Číslo	Název	Vzorek	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1	Předkvartérní podloží		23,00

**Přiřazení a plochy**

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
1		12,35	121,91	13,61	121,70	písek
		15,75	123,32	16,21	124,22	
2		15,71	121,76	16,58	122,05	štěrk
		18,28	123,24	18,83	124,22	
		16,21	124,22	15,75	123,32	
		13,61	121,70			
3		17,78	122,45	22,17	122,71	písek
		22,61	120,70	24,60	120,43	
		26,04	122,21	27,88	122,76	
		29,66	122,93	32,00	121,98	
		32,00	124,25	18,83	124,22	
		18,28	123,24	16,58	122,05	
4		12,64	120,16	13,36	119,06	jíl
		14,54	118,52	15,80	118,79	
		18,31	120,03	20,45	120,36	
		22,61	120,70	22,17	122,71	
		17,78	122,45	16,58	122,05	
		15,71	121,76	13,61	121,70	
		12,35	121,91	11,28	121,26	

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
5		6,36	118,31	7,35	117,98	písek
		10,40	120,34	11,28	121,26	
6		11,81	120,18	12,77	117,69	písek
		13,71	115,26	16,09	117,80	
		19,26	119,21	21,77	119,62	
		24,60	120,43	22,61	120,70	
		20,45	120,36	18,31	120,03	
		15,80	118,79	14,54	118,52	
		13,36	119,06	12,64	120,16	
7		11,28	121,26			štěrk
		23,08	114,49	25,60	114,88	
		27,22	115,05	29,75	115,18	
		31,89	115,18	32,00	115,18	
		32,00	116,92	31,80	117,01	
		29,36	117,15	26,33	116,77	
8		21,94	114,22			písek
		19,95	113,74	21,94	114,22	
		26,33	116,77	29,36	117,15	
		31,80	117,01	32,00	116,92	
		32,00	118,64	29,73	118,61	
		26,89	117,82	24,44	116,35	
9		23,01	115,66	17,69	113,37	štěrk
		13,19	113,22	16,75	113,22	
		17,69	113,37	23,01	115,66	
		24,44	116,35	26,89	117,82	
		29,73	118,61	32,00	118,64	
		32,00	121,98	29,66	122,93	
		27,88	122,76	26,04	122,21	
		24,60	120,43	21,77	119,62	
		19,26	119,21	16,09	117,80	
		13,71	115,26	12,77	117,69	
		11,81	120,18	11,28	121,26	
10		10,40	120,34	7,35	117,98	písek
		6,36	118,31	5,51	117,80	
		10,61	116,31	10,79	113,27	
		0,78	112,48	6,18	113,09	
		8,36	113,33	10,79	113,27	
		10,61	116,31	5,51	117,80	
		4,37	117,12	3,35	116,51	
		-4,65	116,48	-4,66	116,48	
		-4,66	112,48			



Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
11		32,00	112,47	32,00	115,18	Předkvartérní podloží
		31,89	115,18	29,75	115,18	
		27,22	115,05	25,60	114,88	
		23,08	114,49	21,94	114,22	
		19,95	113,74	17,69	113,37	
		16,75	113,22	13,19	113,22	
		10,79	113,27	8,36	113,33	
		6,18	113,09	0,78	112,48	
12		0,78	112,48	-4,66	112,48	Předkvartérní podloží
		-4,66	107,47	32,00	107,47	
		32,00	112,47			

#### Voda

Typ vody : HPV

Číslo	Umístění HPV	Souřadnice bodů HPV [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		-4,66	115,86	2,25	116,02	4,57	116,22
		8,93	117,63	13,03	119,41	16,82	120,77
		21,63	121,73	28,01	122,39	32,00	122,82

#### Nastavení výpočtu

Nastavení výpočtu : Uživatelské

Typ výpočtu : Stupeň bezpečnosti

Stupeň bezpečnosti : 1,20

#### Výsledky (Fáze budování 1)

##### Výpočet 1 (fáze 1)

##### Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
3,39	116,53	6,89	117,11	10,03	118,53	12,17	119,60	15,62	121,28
18,17	123,10	19,10	124,22						
Smyková plocha po optimalizaci.									

#### Posouzení stability svahu (Spencer)

Stupeň bezpečnosti = 1,49 > 1,20

**Stabilita svahu VYHOVUJE**

#### Výsledky (Fáze budování 5)

##### Výpočet 1 (fáze 5)

##### Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
3,39	116,53	7,00	116,96	10,24	118,44	11,91	119,39	15,29	120,97
18,17	123,10	18,95	124,22						
Smyková plocha po optimalizaci.									

#### Posouzení stability svahu (Spencer)

Stupeň bezpečnosti =  $0,92 < 1,20$

**Stabilita svahu NEVYHOVUJE**

#### Výpočet 2 (fáze 5)

##### Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
9,74	120,34	11,55	120,65	13,52	121,19	14,51	121,62	15,07	122,03
15,96	122,89	16,58	123,77	16,80	124,22				
Smyková plocha po optimalizaci.									

##### Úsečky omezující smykovou plochu

Číslo	První bod		Druhý bod	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	9,73	121,73	9,69	113,48

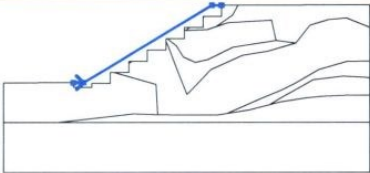
#### Posouzení stability svahu (Spencer)

Stupeň bezpečnosti =  $1,00 < 1,20$

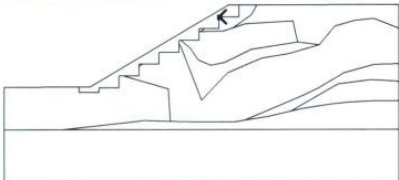

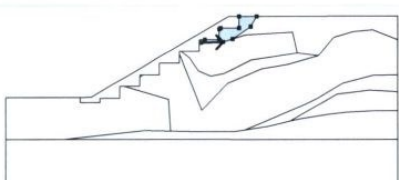

**Stabilita svahu NEVYHOVUJE**

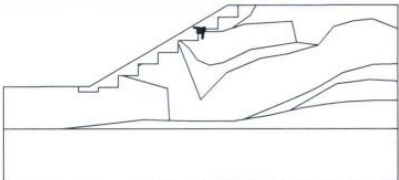
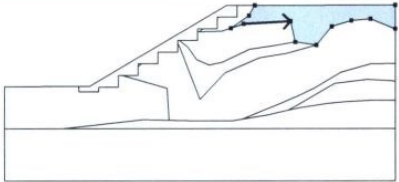
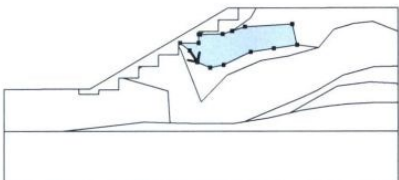
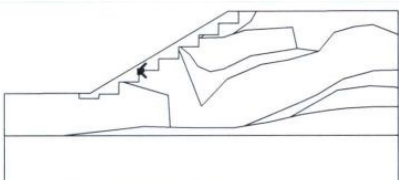
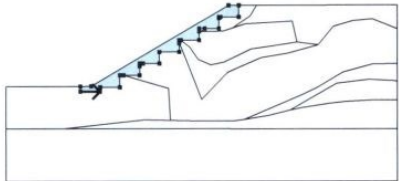
#### Vstupní data (Fáze budování 7)

##### Rozhraní náspu

Číslo	Umístění rozhraní	Souřadnice bodů rozhraní [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		2,33	116,50	3,35	116,51	16,21	124,22
		17,18	124,22				

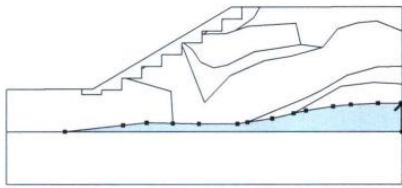
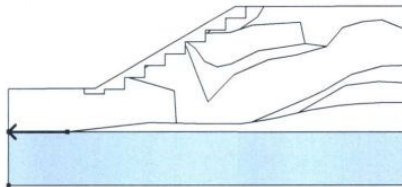
##### Přiřazení a plochy

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
1		15,46	123,10	15,32	123,10	písek
		15,32	122,99			
						
2		13,61	121,70	15,71	121,76	štěrk
		16,58	122,05	18,28	123,24	
		18,83	124,22	17,18	124,22	
		17,18	123,10	15,46	123,10	
		15,32	122,99	15,32	121,99	
		13,99	121,99			
						

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
3		13,61	121,70	13,99	121,99	písek
		13,47	121,99	13,47	121,72	
4		17,78	122,45	22,17	122,71	písek
		22,61	120,70	24,60	120,43	
		26,04	122,21	27,88	122,76	
		29,66	122,93	32,00	121,98	
		32,00	124,25	18,83	124,22	
		18,28	123,24	16,58	122,05	
5		12,64	120,16	13,36	119,06	jíl
		14,54	118,52	15,80	118,79	
		18,31	120,03	20,45	120,36	
		22,61	120,70	22,17	122,71	
		17,78	122,45	16,58	122,05	
		15,71	121,76	13,61	121,70	
		13,47	121,72	13,47	120,88	
6		11,75	120,88			písek
		8,22	118,65	7,90	118,65	
		7,90	118,41			
7		2,33	116,00	4,18	116,00	žebro
		4,19	116,42	6,04	116,42	
		6,04	117,54	6,40	117,54	
		7,90	117,54	7,90	118,41	
		7,90	118,65	8,22	118,65	
		9,75	118,65	9,75	119,76	
		11,61	119,76	11,61	120,59	
		11,61	120,88	11,75	120,88	
		13,47	120,88	13,47	121,72	
		13,47	121,99	13,99	121,99	
		15,32	121,99	15,32	122,99	
		15,32	123,10	15,46	123,10	
		17,18	123,10	17,18	124,22	
		16,21	124,22	3,35	116,51	
		2,33	116,50			

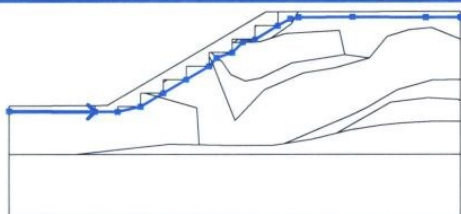


[Geo 5 - Stabilita svahu | verze 5.9.15.0 | hardwarový klíč 4891 / 2 | INSET spol. s r.o. | Copyright (c) FINE s.r.o. 2009 | [www.fine.cz](http://www.fine.cz)]

Číslo	Umístění plochy	Souřadnice bodů plochy [m]				Přiřazená zemina
		x	z	x	z	
13		32,00	112,47	32,00	115,18	Předkvartérní podloží
		31,89	115,18	29,75	115,18	
		27,22	115,05	25,60	114,88	
		23,08	114,49	21,94	114,22	
		19,95	113,74	17,69	113,37	
		16,75	113,22	13,19	113,22	
		10,79	113,27	8,36	113,33	
		6,18	113,09	0,78	112,48	
14		0,78	112,48	-4,66	112,48	Předkvartérní podloží
		-4,66	107,47	32,00	107,47	
		32,00	112,47			

#### Voda

Typ vody : HPV

Číslo	Umístění HPV	Souřadnice bodů HPV [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		-4,66	116,03	2,33	116,00	4,18	116,00
		6,04	116,42	7,90	117,54	9,75	118,65
		11,61	119,76	12,20	120,45	13,47	120,88
		14,34	121,74	15,33	121,97	17,18	123,10
		18,17	123,67	18,85	123,79	23,24	123,82
		29,19	123,79	32,00	123,78		

#### Tahová trhlina

Tahová trhlina není zadána.

#### Zemětřesení

Se zemětřesením se nepočítá.

#### Nastavení výpočtu

Nastavení výpočtu : Uživatelské

Typ výpočtu : Stupeň bezpečnosti

Stupeň bezpečnosti : 1,20

### Výsledky (Fáze budování 7)

#### Výpočet 1 (fáze 7)

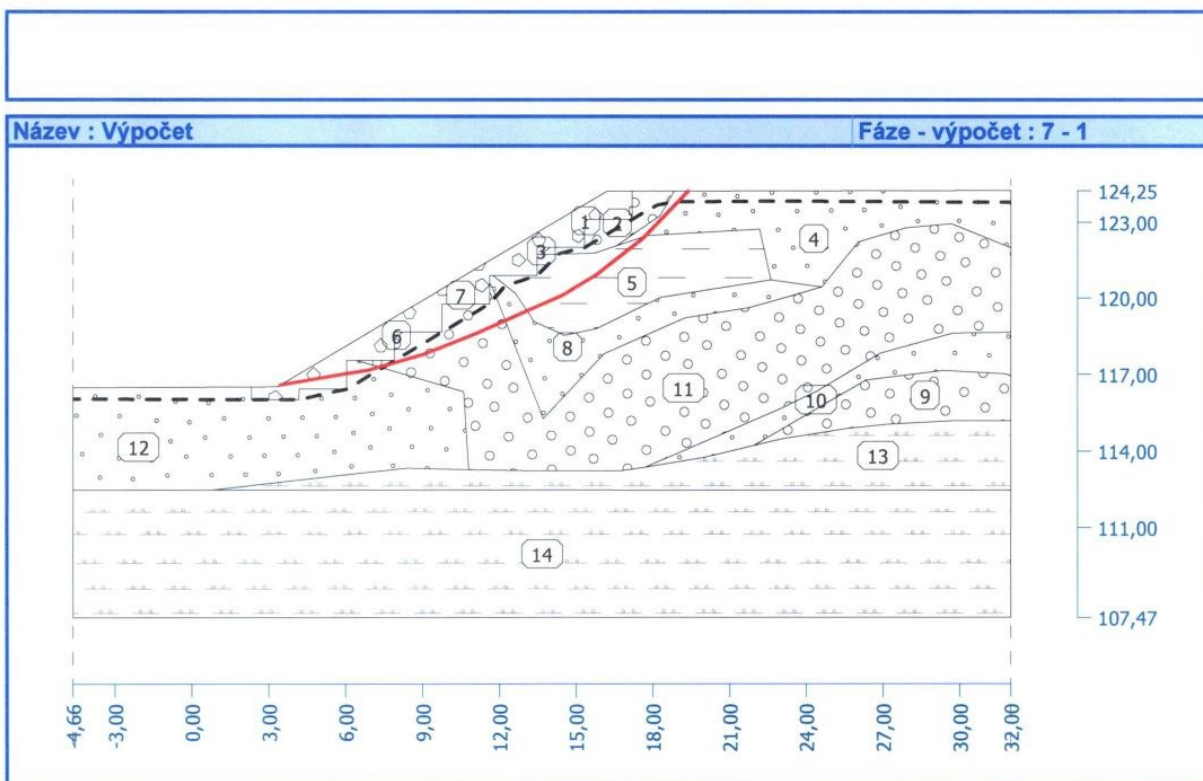
##### Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
3,45	116,57	5,84	116,98	6,81	117,13	9,04	117,78	11,16	118,62
14,53	120,13	15,84	120,93	17,61	122,33	19,38	124,22		
Smyková plocha po optimalizaci.									

#### Posouzení stability svahu (Spencer)

Stupeň bezpečnosti = 1,34 > 1,20

**Stabilita svahu VYHOVUJE**



#### Výpočet 2 (fáze 7)

##### Polygonální smyková plocha

Souřadnice bodů smykové plochy [m]									
x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
9,73	120,33	11,75	120,41	14,49	120,80	17,44	122,38	19,29	124,22
Smyková plocha po optimalizaci.									

##### Úsečky omezující smykovou plochu

Číslo	První bod		Druhý bod	
	x [m]	z [m]	x [m]	z [m]
1	9,73	121,73	9,69	113,48

##### Posouzení stability svahu (Spencer)

Stupeň bezpečnosti = 1,57 > 1,20

**Stabilita svahu VYHOVUJE**